INTRODUCCIÓN A LA RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE

Revitalización social de la radioafición española. SDR como proyecto de nuevas tecnologías aplicado a la radioafición.

Jonathan González Fernández, EA1HET

Analista; BLIS & BSCS; RID G-6462-2010

Citation / Como citar este artículo: GONZÁLEZ FERNÁNDEZ (EA1HET), Jonathan. *Introducción a la radio definida por software. Revitalización social de la radioafición española. SDR como proyecto de nuevas tecnologías aplicado a la radioafición*. En: XXII Jornadas de Radioafición de Avilés, (Avilés 21-23 Agosto 2013). Gijón: 2013.

Abstract. The research described here in introduces the reader to the world of software defined radios, those radios built on top of computer components and programming techniques that implements traditional discrete electronic designs by means of mathematical algorithms. This research establishes a common starting point by describing the whole SDR concept and the basic internal mechanisms that make it work what, later on, will serve as reference for future work and research in the field of radio and SDR.

Resumen: La investigación descrita en el presente documento introduce al lector en el mundo de la radio definida por software, radios que son construidas sobre la base de componentes informáticos y técnicas de programación que implementan algoritmos matemáticos. Esta investigación establece un punto común de inicio describiendo por completo el concepto de SDR y sus mecanismos internos más básicos que lo hacen funcionar, para más adelante, poder continuar investigando, con esta base común, en el campo de la radio y los SDR.

Keywords: sdr software radio algorithm ham dsp iq cat signal fourier fft if band mode am fm pm ssb cw

Palabras clave: sdr software radio algoritmo radioafición dsp iq cat señal fourier fft fi banda modo am fm pm blu cw

1 INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo ha habido cierta preocupación por la reducción de la experimentación en la radioafición española. El impacto socio-económico, cultural y demográfico sobre la comunidad, en general, y de radioaficionados, en particular, así como las asimétricas regulaciones en el servicio por parte de los reguladores, han hecho languidecer la faceta más importante de la radioafición: la experimentación.

Los avances en la electrónica de los últimos treinta años, especialmente aquella parte de la electrónica enfocada en bienes de consumo, han traído consigo el uso generalizado de tecnologías que, ya en la actualidad, van más allá de las habilidades del usuario medio.

La tesis que este artículo propone y presenta es que, con un poco de esfuerzo, es posible trazar una estrategia bien concebida para el uso de nuevas tecnologías aplicadas a sistemas de radiofrecuencia en el marco de la radioafición. Esta estrategia redundaría, con un impacto positivo, en la regeneración de la afición, estimulando el interés por parte de nuevos usuarios, más jóvenes y más motivados, hacia la experimentación con nuevas tecnologías en un medio ya tradicional como lo es la radio. Este panorama representaría (1) el ansiado cambio generacional, una evolución desde las bases sin menoscabar la inherente capacidad del radioaficionado de superarse, reciclarse y evolucionar, y (2) la ruptura definitiva respecto de la dialéctica tradicional sobre los conceptos y preceptos sobre qué modalidades y especialidades pueden ser concebidas como inherentes a un medio de radio y cuáles no, en el marco de los intereses personales y colectivos de la radioafición.

2 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE INFORMÁTICA Y RADIOCOMUNICACIONES

2.1 Definiciones más generales

Una radio definida por software es una radio en la que una o más funciones del transceptor están realizadas por circuitería digital gestionada por software de control (programas de ordenador) en una representación digital de la señal.

Las radios definidas por software utilizan chips[1] para el procesamiento digital de la señal (digital signal processing, DSP) para filtrado, detección, modulación y demodulación de señales. Mientras que con técnicas DSP se puede hacer todo lo que una radio analógica puede hacer, también se pueden hacer funciones que son difíciles o incluso imposibles para las radios analógicas.

La radio definida por software está relacionada con la (r)evolución de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) que están afectando en tantas facetas diferentes a nuestra sociedad actual.

Tradicionalmente los equipos receptores y transceptores de radiocomunicaciones eran equipos constituidos por multitud de componentes electrónicos, los cuales formaban circuitos de todo tipo (sintonizadores, etapas IF[2], detectores, amplificadores, filtros). A mediados de los 80's del siglo pasado se introdujo el uso de microprocesadores en los sistemas de radiocomunicaciones para añadir nuevas prestaciones (controles manuales, visuales, programadores). De todas ellas la que más éxito tuvo, y la que en gran medida allanaría el camino del SDR fue la posibilidad de controlar los equipos de radio desde un ordenador mediante un puerto de comunicaciones: el CAT.

El CAT (transceptor asistido por ordenador, del inglés Computer Aided Transceptor) sentó las bases de la operación de radio desde un ordenador. El uso de CAT implica el uso del puerto serie (también llamado puerto COM) de un ordenador para enviar códigos binarios al equipo de radio que, gracias a la adopción de los microprocesadores, ahora podía cambiar las frecuencias, modos, filtros, etc…, sin que el usuario comandase el equipo manualmente.

2.2 Señales y su representación

La representación eléctrica u óptica de la información que se desea transmitir se denomina señal.

Las señales que viajan por medios de transmisión, así como los equipos que las generan, pueden ser de dos tipos (1) señales analógicas, que son ondas continuas en el tiempo en las que los valores varían de una forma continua (ejemplo: la voz, como ondas de presión), y (2) señales digitales, que son señales analógicas que solo pueden tomar valores discretos (ejemplo: señal binaria donde solo existen dos variantes "0" y "1").

2.3 Señales analógicas

Las señales analógicas surgen cuando una forma de orden física, tal como la onda acústica o lumínica, se convierte en una señal eléctrica. Muchos dispositivos de comunicaciones, tales como teléfonos, cámaras de video y micrófonos, son dispositivos que crean o captan señales analógicas.

La señal analógica es aquella que presenta una variación continua con el tiempo, es decir, que a una variación suficientemente significativa del tiempo le corresponderá una variación igualmente significativa del valor de la señal (que es continua). Toda señal variable en el tiempo, por complicada que ésta sea, se representa en el ámbito de sus valores (espectro) de frecuencia. De este modo, cualquier señal es susceptible de ser representada descompuesta en su frecuencia fundamental y sus

---

[1] Un circuito integrado, también conocido como chip o microchip, es una pastilla pequeña de material semiconductor, de algunos milímetros cuadrados de área, sobre la que se fabrican circuitos electrónicos generalmente mediante fotolitografía y que está protegida dentro de un encapsulado de plástico o cerámica. El encapsulado posee conductores metálicos

[2] Intermediate Frequency; Frecuencia Intermedia. Véase el apartado 5 para mayor detalle.

armónicos[3]. El proceso matemático que permite esta descomposición se denomina análisis de Fourier y/o Transformada Rápida de Fourier (FFT)[4], un algoritmo fundamental en los sistemas de radiofrecuencia y en la radio definida por software.

La utilización de señales analógicas en las comunicaciones todavía se mantiene en la transmisión de radio y televisión, aunque en esta última sea de forma residual[5]. Los parámetros que definen a un canal de comunicaciones analógicas son el ancho de la banda, diferencia entre la frecuencia máxima y la frecuencia mínima a transmitir, y sus potencias, media y de cresta.

2.4 Señales digitales

Una señal digital es aquella que presenta una variación discontinua con el tiempo y que sólo puede tomar ciertos valores discretos. Su forma característica es ampliamente conocida: la señal básica es una onda cuadrada (pulsos) y las representaciones se realizan en el dominio del tiempo. Sus parámetros son (1) la altura de pulso (nivel eléctrico), (2) su duración (ancho de pulso) y (3) su frecuencia de repetición (velocidad pulsos, en intervalos de tiempo medidos por segundo).

Las señales digitales no se producen en el mundo físico como tales, sino que son creadas por el hombre.

Las señales digitales tienen una técnica particular de tratamiento. La utilización de señales digitales para transmitir información se puede realizar de varios modos, (1) en función del número de estados distintos que pueda tener y (2) en cuanto a su naturaleza eléctrica.

Respecto a los estados, si son dos los estados posibles, se dice que son señales binarias, si son tres, ternarias, si son cuatro, cuaternarias y así sucesivamente. Los modos se representan por grupos de unos y de ceros, siendo estos lo que se denomina el "contenido lógico" de información de la señal.

Respecto a su naturaleza eléctrica, una señal binaria se puede representar como la variación de una amplitud (nivel eléctrico) respecto al tiempo (ancho del pulso). Las señales digitales sólo pueden adquirir un número finito de estados diferentes, y se clasifican según el número de estados (binarias, ternarias, etc.) y según su naturaleza eléctrica (unipolares y bipolares).

2.5 Relación entre señales analógicas y digitales

Una señal analógica es una señal que varía de forma continua a lo largo del tiempo. Todas las señales que representan una magnitud física (temperatura, luminosidad, humedad, presión) son señales analógicas.

Una señal digital varía de forma discreta o discontinua a lo largo del tiempo.

Las señales analógicas pueden tomar todos los valores posibles de un intervalo, mientras que las digitales binarias solo pueden tomar dos valores posibles (0 y 1).

---

[3] Las señales periódicas que se utilizan en las transmisiones, tanto en bajas como en altas frecuencias, son pocas veces completamente sinusoidales. De hecho son una mezcla de señales sinusoidales en las que las respectivas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental (o primer armónico), la más baja de todas. Estas frecuencias múltiplos de la fundamental reciben el nombre de armónicos.

[4] La transformada rápida de Fourier se utiliza para pasar al dominio de la frecuencia una señal para así obtener información que no es evidente en el dominio del tiempo. Por ejemplo, es más fácil saber sobre qué ancho de banda se concentra la energía de una señal analizándola en el dominio de la frecuencia. También sirve para resolver ecuaciones diferenciales con mayor facilidad y, por consiguiente, se usa para el diseño de controladores clásicos de sistemas realimentados, si se conoce la densidad espectral de un sistema a la entrada se puede conocer la densidad espectral de la salida. Esto es muy útil para el diseño de filtros de radio a transistores. La transformada de Fourier también se utiliza en el ámbito del tratamiento digital de datos como señales, imágenes, etc....

[5] Las nuevas implementaciones de TDT (Televisión Digital Terrestre) están reduciendo el uso analógico drásticamente.

2.6 Proceso de digitalización de la señal

Un ordenador, o cualquier sistema de control basado en un microprocesador, no puede interpretar señales analógicas, ya que solo utiliza señales digitales. Es necesario traducir, o transformar en señales digitales binarias la señal analógica original, proceso que se denomina "proceso de digitalización" o "conversión de señales analógicas a digitales" (y viceversa).

En la gráfica que se acompaña como Figura 1 se puede observar una señal analógica, la gráfica superior, que para ser interpretada en un ordenador ha de tratarse mediante digitalización. Un medio simple de tratamiento es el muestreo o "sampleado". Este procedimiento se basa en la lectura del valor analógico cada cierto tiempo. Si el valor de la señal analógica en ese instante está por debajo de un determinado umbral, la señal digital toma un valor mínimo (0). Cuando la señal analógica se encuentra por encima del valor umbral, la señal digital toma un valor máximo (1). El momento en que se realiza cada lectura es ordenado por un sistema de sincronización que emite una orden de reloj con un período constante.

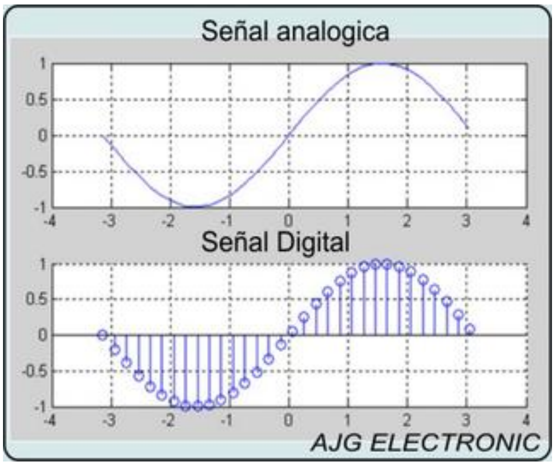


Figura 1: Señal analógica y muestreo digital

En pocas palabras, cualquier señal eléctrica puede ser representada por una sucesión de números que corresponderán al voltaje instantáneo de la señal a intervalos de tiempo uniformes. Cada uno de esos números se denomina muestra de la señal o "sample". La ventaja de representar una señal eléctrica mediante muestras radica en la facilidad con la cual la señal puede procesarse.

Estas conversiones analógico-digitales son habituales en adquisición de datos por parte de un ordenador y en la modulación digital para transmisiones y comunicaciones por radio.

3 JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA

3.1 Por qué nace SDR

En la evolución de las telecomunicaciones, en general, y de las inalámbricas, en particular, han aparecido diversas tecnologías para el intercambio de información entre dos puntos distantes, con requisitos cada vez más exigentes.

Las incompatibilidades entre las diferentes tecnologías existentes han supuesto un problema a la hora de reutilizar equipos o prestar determinados servicios. Un buen ejemplo es la telefonía móvil.

Los SDR surgen para solucionar estos inconvenientes de compatibilidad e interoperabilidad, definiendo un conjunto de procedimientos y técnicas orientadas a realizar el procesamiento de señales de radio por medio de dispositivos de propósito general, los cuales pueden ser modificados mediante software logrando así un cambio dinámico, automático y eficiente entre tecnologías sin tener que incurrir en sobrecostes.

Identificado el problema, surge por tanto la necesidad de diseñar un dispositivo capaz de entregar en banda base[6], Zero-IF o "low-IF", la señal de radio para su procesamiento digital, incluso si

[6] En telecomunicaciones, el término banda base se refiere a la banda de frecuencias producida por un transductor, tal como un micrófono, un manipulador telegráfico u otro dispositivo generador de señales que no es necesario adaptarlo al medio por el que se va a trasmitir. Banda base es la señal de una sola transmisión en un canal, mientras que, por ejemplo, banda ancha significa que lleva más de una señal y cada una de ellas se transmite en diferentes canales, hasta su número máximo de canal. En los sistemas de transmisión, la banda base es generalmente utilizada para modular una portadora. Durante el proceso de demodulación se reconstruye la señal banda base original. Por ello, es posible establecer que la banda base describe el estado de la señal antes de la modulación y de la multiplexación y después de la demultiplexación y

la señal es analógica. Se concibe el dispositivo ideal como aquel que debería de ser configurable para que fuese posible recibir distintos anchos de banda y frecuencias y, posteriormente, con un procesado digital, realizar la sincronización y la detección de la señal recibida.

Fijado el procedimiento que puede dar solución al problema identificado surgen las primeras aproximaciones tecnológicas e implementaciones prácticas a una solución.

3.2 Primeras implementaciones de SDR

La primera implementación importante del concepto SDR fue en el proyecto militar estadounidense "*SpeakEasy*"[7], cuyo objetivo era implementar más de 10 tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas en un equipo programable, operando en la banda de frecuencias de 2MHz a 200MHz.

Uno de los objetivos adicionales del proyecto era que el prototipo debía tener la posibilidad de actualizar su código para que así se pudieran tener en cuenta los estándares futuros. El proyecto fue lanzado en 1991 y en 1995 fue posible lograr todos los objetivos planteados.

El principal problema con el que el proyecto se enfrentó fue que únicamente se podía realizar una comunicación a la vez, por lo que se modificó el alcance inicial del proyecto, dándose cabida a una segunda fase en la cual se trabajarían aspectos como la disminución de tamaño y del coste de producción, el incremento en la capacidad de procesamiento, la simultaneidad de las comunicaciones y el diseño basado en arquitecturas de software libre. La nueva fase del proyecto tomó 15 meses para lograr sus objetivos, obteniéndose importantes resultados que llevaron a fase de producción el nuevo dispositivo, el cual consiguió operar en el rango de 4 MHz a 400 MHz.

Desde entonces, se han diseñado diferentes dispositivos SDR que han marcado un importante avance en este campo. Entre estos, los equipos Universal Software Radio Peripheral (USRP) del fabricante Ettus Research, Serie M3TR del fabricante Rohde&Schwarz, Serie AN/PRC del fabricante Harris, Soluciones FlexNet y F@stnet-Twin del fabricante Thales, Serie FlexNet del proveedor Rockwell Collins, Serie FLEX del fabricante FlexRadio, Serie SDR del fabricante RFSpace, SoftRock del proveedor FiveDash Inc. y LP-Pan del fabricante Telepost Inc, han contribuido especialmente a acercar a los (diferentes) usuarios esta tecnología.

3.3 Visión de negocio, visión de futuro.

Dados los objetivos de diseño de SDR, el conjunto de aplicaciones que en el mundo real esta tecnología permite es muy variado. Entre sus utilizaciones posibles se incluyen nuevos terminales para soportar cualquier tipo de tecnología presente y futura, infraestructura de comunicaciones (como por ejemplo estaciones base de telefonía móvil[8]), y soporte a tecnologías de acceso por radio de banda ancha tanto en entornos privados como públicos (y por supuesto para el servicio de aficionados).

En la primera etapa de madurez (2000-2005) la mayoría de las aplicaciones de SDR eran de tipo militar debido a los altos costes de implementación, correspondiendo el 75% de todas las aplicaciones a este entorno, el 7% a infraestructura inalámbrica comercial, y el 18% a otro tipo de aplicaciones. Los avances en microelectrónica y en plataformas de desarrollo de software para SDR, así como su inclusión como alternativa para la construcción de la capa física de los estándares de redes modernas, han hecho que el mercado de SDR en el 2007 sobrepasase los 4 billones de Euros, de los cuales más de 300 millones corresponderían a la venta de procesadores banda base para SDR, aumentando estos valores exponencialmente en los años siguientes.

---

demodulación. Las frecuencias de banda base se caracterizan por ser generalmente mucho más bajas que las resultantes cuando éstas se utilizan para modular una portadora o subportadora.

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/SpeakEasy

[8] Tanto comerciales como Open Source. En esta línea, véase el Apéndice 2, Proyecto OpenBTS.

Centrándose en la cadena de valor[9], existen tres entes, (1) los vendedores de dispositivos y componentes base para SDR, (2) los vendedores de infraestructura y equipos basados en SDR y (3) los usuarios. Sin embargo hay que tener en cuenta que la mayoría de las tecnologías están orientadas a ofrecer datos y servicios multimedia, por lo que los desarrolladores de software base y de aplicaciones, así como los desarrolladores de contenido y operadores, tendrán un papel importante en esta cadena de valor y especialmente en los modelos de negocio que se formarán alrededor de SDR.

La cadena de valor debe madurar incorporando, más temprano que tarde, otro actor: el regulador. A fecha actual no existe una regulación clara en torno a la Radio Definida por Software pero parece evidente que gran parte del éxito de SDR vendrá marcado por la flexibilidad de la regulación y la estandarización, donde SDR juega un papel imprescindible.

4 CONCEPTO DE SDR

4.1 Lo que no es SDR

Todos, o casi todos, los equipos de radio modernos tienen la capacidad de ser controlados desde un ordenador con un software. Incluso existen equipos de radio que no tienen un frontal de mandos y son, en su totalidad, operados a través de un software instalado en un ordenador. Esto no es un SDR de por sí.

SDR tampoco se refiere al uso de técnicas sofisticadas de procesado digital de señales mediante el uso de chips DSP, implementados generalmente a nivel de etapas de audio, cuyo objetivo es mejorar la inteligibilidad y calidad de la señal recibida. Incluso cuando las implementaciones se realizan a nivel de frecuencia intermedia no se está dentro del marco que SDR define. El concepto de SDR se expande sobre un marco de trabajo mayor.

4.2 Definición del concepto SDR

El concepto SDR responde a un paradigma sencillo: acercar el código software lo máximo posible a la antena, convirtiendo así problemas hardware en problemas software.

El concepto SDR ha ido evolucionando con los años pero se siguen basando en el esquema básico que se muestra en la Figura 2, compuesta por tres bloques funcionales: (1) sección de radiofrecuencia (RF), (2) sección de IF y (3) sección banda base. La parte de RF e IF generalmente se implementan en hardware mientras que la sección de banda base en software.

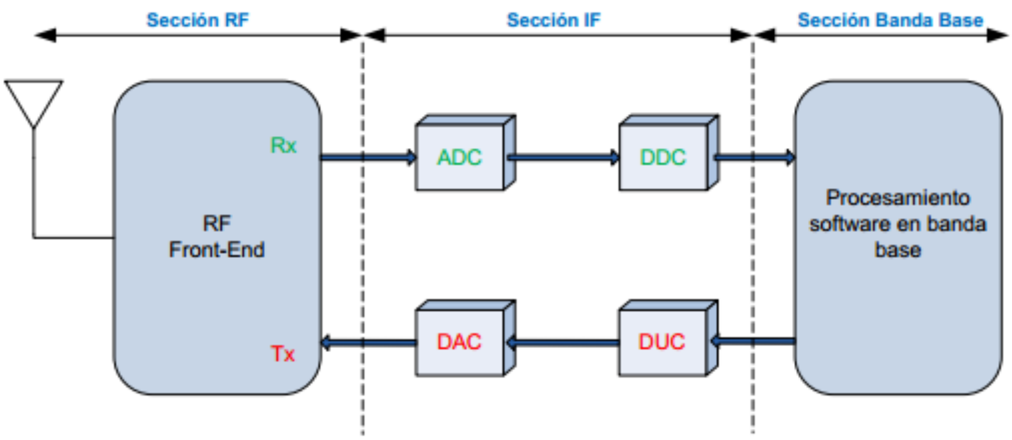


Figura 2: Esquema básico de un SDR

[9] La cadena de valor empresarial, o cadena de valor, es un modelo teórico que permite describir el desarrollo de las actividades de una organización empresarial generando valor al cliente final. Este modelo fue descrito y popularizado por Michael Porter en su obra "Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance" (1985). Las actividades primarias se refieren a la creación física del producto, diseño, fabricación, venta y el servicio posventa, y pueden también a su vez, diferenciarse en sub-actividades, directas, indirectas y de control de calidad.

La sección de RF, también denominada RF Front-End o cabecera de RF, es la encargada de transmitir/recibir las señales de radiofrecuencia para adecuarlas y convertirlas en frecuencia intermedia (IF en recepción) o amplificar y modular las señales de IF (IF en transmisión). La frecuencia intermedia puede ser 0, dando lugar al concepto de Zero-IF o "low-IF", el cual es posible gracias a los avances en la producción de los componentes hardware.

La sección de IF se encarga de pasar la señal de IF a banda base y digitalizarla (en recepción) o pasar la señal de banda base a IF y hacer la conversión digital-analógica de la señal (en el caso de la transmisión). Las encargadas de la conversión analógica-digital o digital-analógica de la señal son los módulos ADC/DAC. A su vez, se insertan los módulos DDC/DUC[10] para poder bajar/subir, respectivamente, la tasa de muestreo[11] en el sentido de recepción/transmisión, consiguiendo que la tasa de muestras por la interfaz entre IF y banda base sea inferior.

La sección de banda base es la encargada de todo el procesamiento en banda base de la señal como modulación/demodulación, análisis espectral de la señal, etc... llevándose a cabo en software en su totalidad.

4.3 Como opera un SDR

Dada la definición anterior de SDR, la misión única de sus diferentes componentes es convertir señales altas en otras más bajas.

En recepción, la señal de radiofrecuencia original es, tras ser recibida, bajada de rango, del original al rango de las frecuencias de audio. No obstante, esta señal sigue siendo una señal sin demodular. En detalle, una etapa de conversión directa lo que hace es trasladar las señales de radiofrecuencia a otras frecuencias muy inferiores, pero aunque las señales obtenidas en la conversión son señales en el rango de las frecuencias de audio, esto no significa que sean señales ya demoduladas (aunque para varios tipos de modulación, como la telegrafía o la banda lateral única, sí lo serán). Dicha señal ya desplazada en frecuencia a la banda de audio (pero todavía sin demodular) ocupa un margen de frecuencias que entra dentro del margen que acepta en sus entradas analógicas una tarjeta de sonido (como elemento conversor). Dependiendo de los diferentes modelos utilizables, una tarjeta de sonido puede aceptar señales desde 8 kHz a 192 kHz, llegando en algunos casos incluso a 1 MHz, aunque esto no es lo habitual. En el caso de transmisión el proceso es exactamente el inverso y el punto de confluencia se mantiene: la modulación de la señal.

La tarjeta de sonido de un ordenador incluye conversores analógico-digital (A/D) que digitalizan las señales presentes en las entradas de la tarjeta, generando un flujo continuo de bits que representan digitalmente las señales analógicas de entrada. A este respecto, se puede decir que el conversor A/D está conectado casi directamente a la antena. La tarjeta de sonido además proporciona todas las funcionalidades DSP que van a ser necesarias para manejar la señal entrante ya digitalizada. Un esquema a alto nivel de cómo opera un SDR se ilustra en la Figura 3, en la página siguiente.

En la digitalización de las señales de entrada se transforman las señales analógicas, que son "continuas en el tiempo" y con un número de valores de amplitud teóricamente infinitos, en una secuencia de señales "discretas en el tiempo", esto es, que se presentan a intervalos de tiempo determinados, y que se denominan "muestras" o "samples". Una vez digitalizadas las muestras de la señal analógica, transformando cada muestra o sample en un número fijo de bits, las señales eléctricas que las componen (los bits) tendrán un número de valores posibles de amplitud fijo y determinado. En el caso de las señales digitales binarias serán solamente dos, denominados "0" y "1" lógicos.

---

[10] DDC y DUC: Digital Down-Converter y Digital Up-Converter

[11] Refiérase al apartado 2.6 del presente documento: Proceso de digitalización de la señal

La demodulación de una señal es un proceso relativamente simple que incluye, a su vez, procesos de filtrado, desplazamiento de nivel y algunas otras operaciones que se pueden realizar sin muchos problemas por software. Cualquier proceso al que desee someterse la señal de audio digitalizada se puede hacer por software, usando el programa adecuado en el ordenador, y usando la tarjeta de sonido como dispositivo digitalizador de la señal analógica de audio.

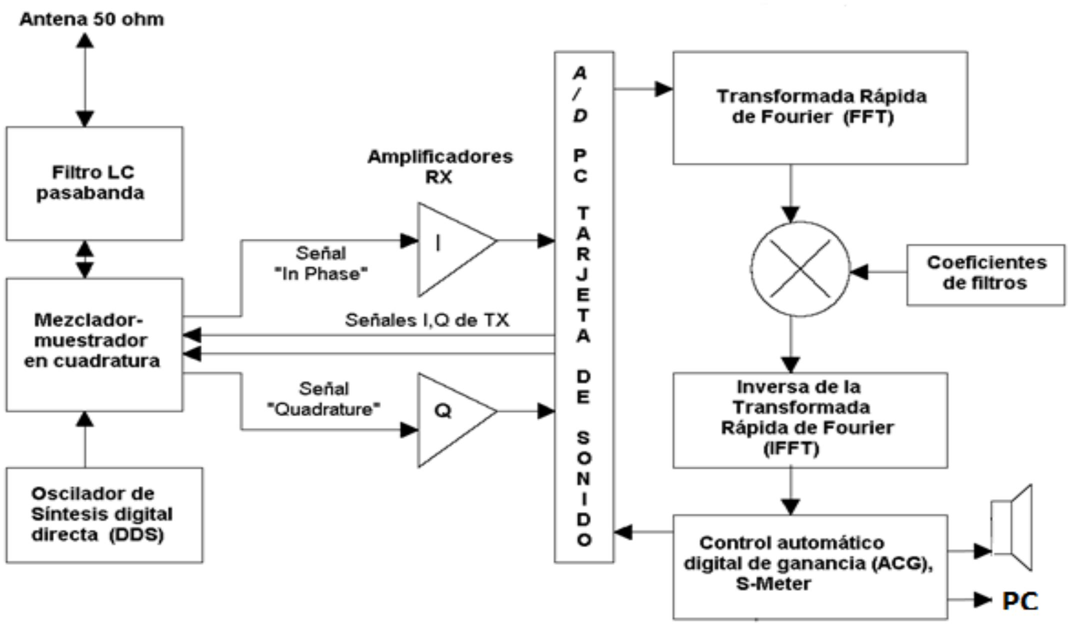


Figura 3: Etapas internas generales de un SDR

5 SDR EN PROFUNDIDAD

5.1 La tarjeta de sonido como dispositivo superheterodino

Las tarjetas de sonido de los ordenadores son capaces de operar con señales de audio de entre 20 kHz y hasta 1Mhz, si esta última tarjeta es de calidad profesional.

Dado que la tarjeta de sonido no puede manejar frecuencias tan elevadas como las que son manejadas en los dispositivos de radiofrecuencia es necesario convertir las señales de radiofrecuencia a señales de frecuencias muy inferiores, en el rango de frecuencias que puede aceptar la tarjeta de sonido, es decir, en el rango de las bajas frecuencias, manteniendo éstas el mismo esquema de modulación de las señales de radiofrecuencia recibidas.

5.2 Conversión de frecuencia (concepto general)

El sistema más habitual para convertir una señal de una banda de frecuencias a otra es mediante el uso de un mezclador. El mezclador combina dos señales, la que se recibe a través de la antena con la procedente de un oscilador local, la cual será una señal pura sin modular y muy estable en frecuencia.

El proceso de conversión antes mencionado es típico en los receptores superheterodinos[12] para convertir la señal recibida a una IF de un valor fijo predeterminado. La IF obtenida a la salida del

[12] En electrónica, un receptor superheterodino es un receptor de ondas de radio que utiliza un proceso de mezcla de frecuencias o heterodinación para convertir la señal recibida en una frecuencia intermedia (IF) fija, que puede ser más convenientemente elaborada (filtrada y amplificada) que la frecuencia de radio de la portadora original. Prácticamente todos los receptores modernos de radio y televisión utilizan el principio superheterodino.

mezclador es filtrada y amplificada en una etapa de varios pasos sintonizados a la frecuencia concreta de trabajo de esa IF predeterminada, de manera que solo esa, y no las otras señales que se obtienen a la salida del mezclador, estará lo suficientemente filtrada y amplificada antes de ser entregada al demodulador para ser manipulada.

Cuando se mezclan dos señales, a la salida del mezclador se obtienen varias componentes, (1) la suma de las señales entrantes al mezclador, (2) la resta de las señales entrantes al mezclador, (3) la señal original de la antena y (4) la señal generada en el oscilador local. Para controlar la mezcla y sus resultantes adicionales es preciso introducir un filtrado a la salida del mezclador cuyo objetivo es dejar pasar la señal que sea de interés y elimine el resto. Sin embargo, aunque eliminar por filtrado las señales no deseadas es una tarea fácil, este comportamiento supone una pérdida de energía respecto a la señal original, lo que perjudica el rendimiento del receptor en cuanto a la relación señal/ruido. Esto es así porque la potencia de la señal de entrada útil, la de antena, se redistribuye entre sus diferentes versiones cambiadas de frecuencia (las varias componentes generadas a la salida del mezclador), además de que la presencia del propio mezclador introducirá pérdidas adicionales en el proceso de conversión de frecuencia.

Dependiendo de la calidad de los pasos sintonizados a la IF, la selectividad del receptor será mejor o peor, esto es, tendrá mejor o peor capacidad de rechazo a frecuencias adyacentes a la sintonizada. Valores típicos de IF en los receptores superheterodinos ordinarios son 455 kHz (receptores de frecuencias bajas: Onda Media, Onda Larga y también Onda Corta), ~8 y ~10 MHz (para frecuencias más altas, como es la banda de radiodifusión en FM y los buenos receptores de Onda Corta)[13].

Los receptores superheterodinos tienen un problema adicional, y es que si la frecuencia del oscilador local y la IF que se emplea en el receptor dan lugar en el mezclador, a su salida, al propio valor de la IF se considerará que la frecuencia útil que se quiere recibir es una de las dos (a elegir), entendiéndose la otra como una frecuencia perturbadora, que se conoce como Frecuencia Imagen. La frecuencia útil y la frecuencia imagen estarán distanciadas en un valor de frecuencias de dos veces el valor de la IF por tanto.

Normalmente, con un buen filtro sintonizado en la etapa de entrada del receptor se puede rechazar la frecuencia imagen y apreciar la frecuencia útil. Así, en un receptor de Onda Media (530-1600 kHz), que usa una IF típicamente de 455 kHz, la frecuencia imagen estará a 910 kHz de la frecuencia sintonizada, y usando un circuito sintonizado en la entrada del receptor a la frecuencia útil, suele ser suficiente para rechazar las señales que pueda haber en la frecuencia imagen. Pero a frecuencias más altas la selectividad del paso de entrada del receptor es claramente insuficiente para rechazar las frecuencias imágenes, y es por ello que los receptores de Onda Corta de calidad media-baja captan claramente las señales de frecuencia imagen junto con la señal sintonizada. Este comportamiento hace ver que el oscilador local del receptor debería oscilar 455 kHz por encima o por debajo de la frecuencia que se desea recibir.

Si se desea recibir la frecuencia de 10.455 kHz, el oscilador local debería oscilar a 10.000 kHz (o a 10.910 kHz), pero con esta frecuencia del oscilador también podrá recibir la frecuencia de

10.000 kHz – 455 kHz = 9.545 kHz

la cual sería la frecuencia imagen de 10.455 kHz. Dependiendo de la calidad del circuito de sintonía del receptor, esta frecuencia imagen será mejor o peor rechazada, pero en este caso, la relativa proximidad entre ambas frecuencias, y la baja selectividad de los circuitos de sintonía a esas frecuencias, hará que la frecuencia imagen sea normalmente poco rechazada, con lo que se escucharían en el mismo punto de sintonía del receptor señales que se transmitan en ambas frecuencias, 10.455 kHz y 9.545 kHz.

---

[13] Véase el Apéndice 6.

Para evitar estos inconvenientes, se usan valores de frecuencia intermedia más altos, por ejemplo, ~8 MHz o ~10 MHz, lo que implica que la frecuencia imagen estará en torno a ~21 MHz de la frecuencia sintonizada (como se dijo, al doble del valor de la IF), y esta gran diferencia de frecuencias permitirá atenuar suficientemente la frecuencia imagen con el circuito de sintonía de la señal de antena del receptor.

En todo caso, hay un tipo de receptores que usan un mezclador de señales pero no emplean ninguna IF. Al contrario, convierten la señal directamente a audio, y son los llamados Receptores de Conversión Directa. Estos receptores permiten la demodulación de señales de CW (telegrafía) y de SSB (Single Side Band) por simple conversión de frecuencias. Suponiendo que se tiene una señal de CW en 14.001 kHz y se emplea un oscilador local oscilando a 14.000 kHz, si ambas señales se combinan en un mezclador, a la salida del mezclador se obtendrá, entre otras señales, una señal de CW en audio, con una frecuencia de 1 kHz, señal que corresponde a la diferencia entre la señal procedente de la antena (14.001 kHz) y la del oscilador local (14.000 kHz). Dado que en CW se transmite como impulsos de portadora, a la salida del mezclador se tendrán impulsos de 1 kHz que, al ser audibles (tras la correspondiente amplificación de audio), corresponderán a la señal telegráfica demodulada. Si hubiera otra señal transmitiéndose en 13.999 kHz, demasiado cercana en frecuencia a la de 14.001 kHz como para poderla rechazar eficazmente mediante filtrado en el paso de antena del receptor, esta señal también daría lugar a la salida del mezclador a una señal de audio de 1 kHz, e interferiría a la señal de CW de 1 kHz correspondiente a la señal transmitida en 14.001 kHz. Esta señal será por tanto una frecuencia imagen de la frecuencia que realmente interesa recibir. Es más, incluso aunque no hubiesen señales en la frecuencia imagen de 13.999 kHz, el ruido de fondo en dicha frecuencia aparecería en la salida del receptor, empeorando la calidad en recepción de la señal útil de CW.

5.3 Conversión de frecuencia en un SDR

El procedimiento de conversión de frecuencia en un receptor de conversión directa no es el adecuado para un receptor SDR por los problemas anteriormente mencionados. El tipo de conversión utilizada en SDR elimina estos problemas, y se basa en el procedimiento que en los primeros días de la SSB se utilizó para conseguir la modulación de Banda Lateral Única (BLU), eliminando en el proceso de modulación la banda lateral que no interesaba, sin el uso de los filtros a cristal de paso banda estrecho (2,4/3 kHz) que se usan hoy en día para dejar pasar la banda lateral que interesa y eliminar la otra.

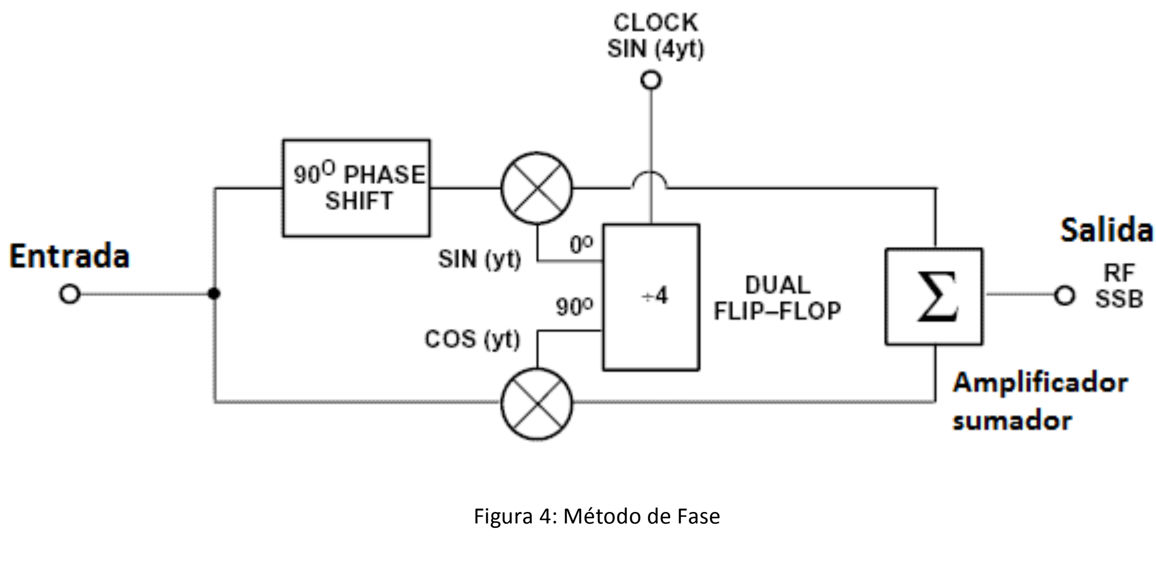


Figura 4: Método de Fase

Dicho método, conocido como "Método de Fase" (Figura 4), consistía en usar un doble mezclador balanceado al cual se aplicaban dos versiones de la frecuencia del oscilador local, una en

fase y la otra desfasada 90 grados, y dos versiones de la señal recibida en antena, una en fase y otra desfasada 90 grados. Si ésta última estaba desfasada exactamente +90 grados respecto a la otra, a la salida del mezclador se obtenía la banda lateral superior (USB), cancelando la banda lateral inferior (LSB), mientras que si estaba desfasada -90 grados, la que se cancelaba era la banda lateral superior (USB), obteniéndose la banda lateral inferior (LSB).

Este procedimiento puede aplicarse a un receptor de conversión directa, y funcionaría exactamente igual, teniendo como ventajas que no habría problemas de frecuencia imagen, aunque ésta estuviera muy próxima a la frecuencia sintonizada (en los moduladores de BLU según el procedimiento del método de fase, cada banda lateral única es frecuencia imagen de la otra).

En el ejemplo anterior, si el oscilador oscila a 14.000 kHz, se podría recibir limpiamente una señal de frecuencia 14.001 kHz como un tono de 1 kHz (diferencia de frecuencias) sin que fuese perturbada por la presencia de señales en 13.999 kHz. Si se cambiara el desfase de +90 grados de la señal recibida en antena (y que es desfasada) por -90 grados, se recibirían las señales de 13.999 kHz sin que fueran perturbadas por señales presentes en 14.001 kHz.

Este procedimiento, empleado tanto para la modulación como para la demodulación, se denomina “Mezcla en cuadratura”, “Detección de SSB por giro de fase”, o “Mezcla con rechazo de imagen”. El doble mezclador empleado se denomina “Mezclador de cuadratura” o “Mezclador IQ”. Esta última denominación se debe porque a la señal convertida correspondiente a la original no desfasada se denomina “Señal en Fase” o “Señal I” ("In-phase signal"), mientras que la señal convertida correspondiente a la señal original desfasada +90 (o -90) grados se denomina “Señal en Cuadratura” o “Señal Q” ("Quadrature signal").

A la salida de los dos mezcladores se obtienen las señales I y Q, que están en “Cuadratura de Fase”. Ambas señales son exactamente iguales, pero desfasadas 90 grados (en el caso ideal). Llevando estas señales a un circuito sumador adecuado, se obtendría a la salida de éste la señal deseada, libre de la frecuencia imagen. Es en el circuito sumador donde, dependiendo de la fase de la señal Q respecto a la señal I, se suprime como frecuencia imagen las frecuencias recibidas que estén por encima o por debajo de la frecuencia del oscilador local, reforzándose la otra.

Para que este método sea realmente efectivo, las dos señales I y Q deben de estar bien balanceadas en amplitud y fase, ya que incluso mínimas inexactitudes en el desfase de 90 grados de la señal Q, o en la igualdad de amplitud de las dos señales I y Q, daría lugar a que no desapareciera totalmente la otra banda lateral (frecuencia imagen) que debe suprimirse, perjudicando el rendimiento final. Conseguir implementar mediante circuitos analógicos un desplazador de fase de +90 grados, que fuese preciso y uniforme en amplitud y en desplazamiento de fase en todo el ancho de banda de las señales de audio moduladoras se antoja muy difícil y costoso de conseguir.

Los equipos SDR se basan en el mismo método, tal y como se presenta en el esquema de la Figura 5.

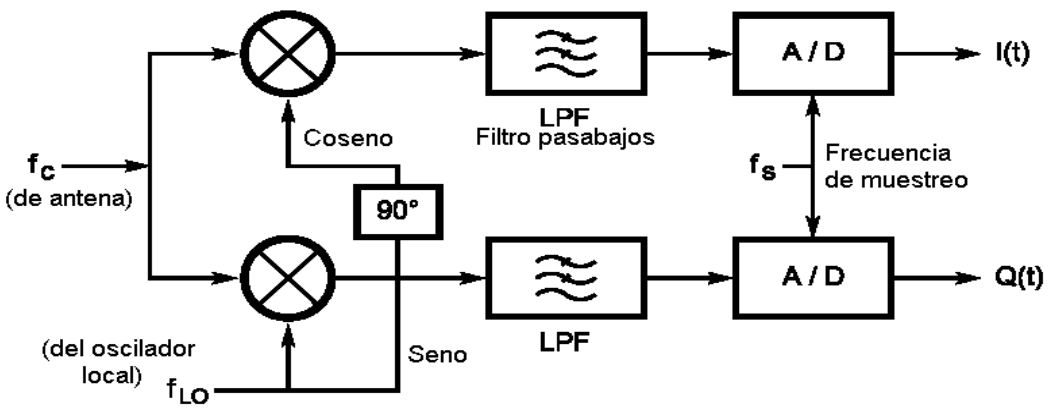


Figura 5: Tratamiento de la señal y obtención de señales en cuadratura de fase (IQ)

La señal de radiofrecuencia es llevada a dos mezcladores idénticos en paralelo. El oscilador local genera la frecuencia de mezcla, que es inyectada directamente al mezclador inferior (señal "seno") para obtener la señal en fase ("I") a la salida del mezclador. Una parte de la señal pasa por un desfasador de 90 grados para obtener una señal del oscilador local desfasada 90 grados (señal "coseno") que es llevada al mezclador superior, obteniéndose a su salida la señal en cuadratura ("Q"). Las señales I y Q pasan por sendos filtros paso banda (LPF) para eliminar las frecuencias no deseadas que aparecen en los procesos de mezclado de las señales, filtrando la señal deseada, y a continuación, son muestreadas o "sampleadas" y digitalizadas individualmente en sendos conversores analógico-digitales (A/D) para obtener las señales I y Q digitalizadas (It, Qt, discontinuas en el tiempo).

Igual que ocurría con los antiguos equipos de SSB que usaban este principio, en un receptor SDR, si las señales de antena se someten a desfases de 90 grados precisos para obtener señales de la misma amplitud y desfasadas 90 grados exactamente, y si se emplean mezcladores idénticos, la supresión de las frecuencias imagen sería total. En la práctica, en un buen receptor SDR de conversión directa, se llegan a obtener supresiones de frecuencias imagen de hasta más de 40 dB.

5.4 Detección de cuadratura de la señal en un SDR

En un equipo SDR para obtener las señales I y Q se utiliza el llamado "Detector por Muestreo en Cuadratura" (QSD) original de Dan Tayloe (N7VE, radioaficionado y especialista técnico que trabaja para Motorola), que es un elegante detector por muestreo que toma muestras de la señal de radiofrecuencia cuatro veces por ciclo de su portadora, dando lugar a cuatro salidas de la señal de radiofrecuencia con desfases respectivos de 0, 90, 180 y 270 grados. Al tratarse de un circuito muestreador y no de un mezclador, se obtienen las señales I y Q, pero sin las pérdidas y otras problemáticas antes expuestas. Dicho detector se conoce también como "Detector Tayloe" (en honor a su desarrollador). Su funcionamiento se expone en la Figura 6. Más información en el Apéndice 7.

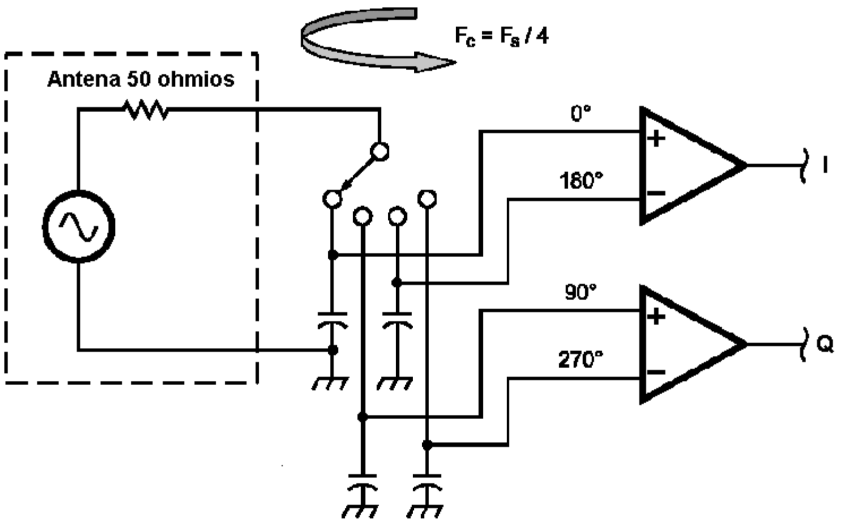


Figura 6: Circuito Detector Tayloe (QSD)

Supóngase un conmutador rotativo conectado al circuito de entrada o de antena, de cuatro posiciones, que gira a la frecuencia de portadora (Fc) de la señal de radiofrecuencia que se quiere detectar. En cada contacto hay un pequeño condensador a masa. Durante el giro del conmutador, cada contacto, al ser tocado por el conmutador, recibirá la tensión de la señal de radiofrecuencia entrante, durante exactamente un cuarto de ciclo de portadora. El nivel de tensión de radiofrecuencia presente en la entrada del conmutador es aplicado al condensador, el cual quedará cargado con un valor de tensión promediado entre los valores de la tensión de la señal de

radiofrecuencia entrante en ese cuarto de ciclo de la portadora. El condensador mantiene esta tensión de carga un cierto tiempo, y un ciclo de portadora después el conmutador volverá a tocar el mismo contacto y se repetirá el mismo proceso. Las tensiones adquiridas así por cada condensador, al ser integradas (promediadas) a lo largo de las sucesivas muestras, darán lugar a una señal audio en bornes de cada condensador.

El proceso es una especie de conversión directa, donde el audio se obtiene en cada contacto del conmutador rotatorio por detección síncrona en un punto determinado de la fase del ciclo de la señal de entrada: en C1, a O grados; en C2, a 90 grados; en C3, a 180 grados; y en C4, a 270 grados. Esto es totalmente correcto si la frecuencia de giro de rotación es exactamente igual a la frecuencia de radiofrecuencia entrante.

Siguiendo este método se obtienen cuatro señales de audio con distintos desfases en las salidas del conmutador rotatorio. A partir de estas cuatro señales se obtienen las señales I y Q necesarias para realizar la demodulación mediante la implementación de algoritmos en software. Las señales con desfases de 0 y 180 grados se aplican en las dos entradas de un amplificador operacional, obteniéndose en su salida la componente en fase ("I"), mientras que las señales con desfases de 90 y 270 grados se aplican a las entradas de otro amplificador operacional, obteniéndose en su salida la componente en cuadratura ("Q").

Si la frecuencia de la señal entrante difiere de la frecuencia de rotación del conmutador, la suma de las fases invertidas que generan las señales I y Q será menor a medida que la diferencia de frecuencias sea mayor, pues la detección de la señal entrante ya no es síncrona en fase, y las frecuencias de audio obtenidas dependerán de dicha diferencia de frecuencias.

Las señales obtenidas en las detecciones síncronas son filtradas por la red de paso bajo que conforman la impedancia de la antena (*Rant*) y el condensador de muestreo (*C*) de cada punto del conmutador rotatorio, con lo que el ancho de banda (*BW*) de las señales de audio obtenidas en cada punto del conmutador será equivalente a

$$\mathrm{BW} = \frac{1}{\pi \cdot Rant \cdot C}$$

Es obvio que los cuatro condensadores de muestreo del detector Tayloe deberán ser exactamente iguales para obtener las mejores características de este tipo de detector.

El detector Tayloe opera similarmente a un filtro de conmutación digital, y ello significa que opera como un filtro seguidor de muy alto Q. El ancho de banda de la señal que entrega a su salida depende del número total de condensadores de muestreo, cuatro en total (uno por posición del conmutador rotatorio), por lo que el ancho de banda de la señal de salida será equivalente a

$$\mathrm{BW} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot Rant \cdot C}$$

y el Q del detector (que determinará la selectividad del receptor) será equivalente a

$$\mathrm{Q} = \frac{Fc}{BW}$$

siendo Fc la frecuencia central de entrada.

El detector por muestreo en cuadratura (QSD) es un detector lineal con una salida de audio de cuatro fases, que se emplean para generar las componentes I y Q. Cuando las fases son sumadas dos a dos para obtener las componentes I y Q, al ser sumadas diferencialmente en un amplificador operacional de alta impedancia de entrada, el detector QSD entrega las señales I y Q con una ganancia de conversión de tensión de 6 dB y prácticamente libre de ruido de conversión.

Lo interesante del circuito detector Tayloe, o detector QSD, es su rechazo a señales de frecuencias diferentes a la de rotación del conmutador. Aunque éstas también son convertidas en muestras de audio de baja frecuencia, aparecerán en la banda de audio desplazadas de frecuencia respecto a las señales útiles. Esto permite que, mediante un buen filtrado de las señales de audio, se puedan eliminar las señales no deseadas, y así obtener una buena selectividad.

5.5 Demodulación

Todo el tratamiento de señales descrito hasta el momento se basa en su implementación sobre banda base y tras la misma se debe proceder a la digitalización de las señales resultantes I y Q para proporcionar todas las funciones del receptor, sacando partido a la potencia del DSP implementado en la tarjeta de sonido y usando el hardware/software adecuado para la escucha y representación visual.

Las tarjetas de sonido pueden ser (semi-)programadas para actuar como un CAG[14], demodular una señal, eliminar señales no deseadas (como en los equipos más caros con DSP), reducir el ruido (NB[15]), silenciar (squelch), etc... absolutamente todo lo que puedan hacer los equipos de radio, mas algunas cosas de las que éstos serían incapaces; y todo ello con la ayuda de en un ordenador.

El circuito detector QSD de Tayloe descrito en la sección anterior obtiene y genera las señales I y Q a nivel analógico. Estas son entregadas a la tarjeta de sonido la cual, en un primer paso, las muestrea y las digitaliza. Al digitalizar las señales I y Q, se obtienen una sucesión de conjuntos de bits discretos en el tiempo que codifican numéricamente el valor de amplitud de ambas señales. La digitalización de las señales I y Q da lugar a una sucesión de números binarios que indican las amplitudes instantáneas de ambas señales a intervalos regulares en el tiempo. Sobre estos valores ya es posible actual mediante algoritmos software para el cálculo de los valores de amplitud de la envolvente, en el caso de las modulaciones de AM (amplitud), y de los desplazamientos de fase y frecuencia de la señal recibida, en el caso de las modulaciones FM y PM (frecuencia y fase, respectivamente).

Los resultados de este procesamiento mediante software serán también valores binarios, que al ser aplicados a un conversor digital-analógico (dispuesto en la misma tarjeta de sonido), permitirá obtener la señal moduladora ya a nivel analógico, y una vez esta es amplificada, es posible llevarla al altavoz conectado a la tarjeta de sonido para la escucha de la ansiada señal.

Procedimiento análogo es aquel que sucede mediante software en lo que respecta a la visualización mediante programas de uso específico para el tratamiento de la señal demodulada. La mayor parte de estos programas de uso específico implementan Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) para el tratamiento de señales y sus atractivas visualizaciones.

5.6 Post-demodulación y FFT

FFT (Fast Fourier Transform; Transformada Rápida de Fourier) es una herramienta matemática que permite realizar muy diversos tratamientos de las señales digitalizadas (filtrados, demodulaciones, ecualizaciones, etc...), y que se emplea en los receptores SDR para el tratamiento de las señales I y Q entregadas por el hardware del equipo SDR.

[14] CAG: Control Automático de Ganancia; en inglés AGC, Automatic Gain Control.

[15] NB: Noise Blanker; Eliminador de Ruido.

En SDR se emplean las FFT y su función inversa, IFFT (Transformada Rápida de Fourier inversa) para las funciones de modulación y demodulación en banda lateral única (SSB) y para funciones de filtrado de señales.

Matemáticamente lo que hace una FFT es transformar señales pertenecientes al dominio del tiempo a señales equivalentes dentro del dominio de la frecuencia, es decir, dada una señal cuya forma de onda es conocida a lo largo del tiempo (dominio del tiempo), esta es analizada para conocer su composición espectral, es decir, conocer el conjunto de frecuencias que las componen y sus amplitudes respectivas (dominio de la frecuencia).

Toda señal está compuesta por una o más componentes de distintas frecuencias, y los análisis matemáticos de Fourier permiten deducir las distintas frecuencias y sus amplitudes que componen una señal cualquiera en función de la forma de la onda de la señal. Así, una señal senoidal pura está constituida por una única frecuencia (tono puro), mientras que si la forma de la onda senoidal se distorsiona, aparecen junto con la frecuencia fundamental otras frecuencias adicionales, como pueden ser frecuencias armónicas de la fundamental, bandas laterales junto a la frecuencia fundamental, frecuencias aleatorias que representan al ruido, etc..., todo ello dependiendo de la forma de onda de la señal.

La forma de la onda de la señal en el tiempo es conocida, ya que se deduce de los sucesivos valores de amplitud de ésta en el tiempo, y dado que al ser digitalizada la señal los valores de amplitud se codifican en valores numéricos binarios a intervalos de tiempo regulares, se pueden aplicar a estos las fórmulas matemáticas de Fourier para conocer la composición espectral de la señal analógica original.

El resultado de analizar una señal mediante FFT equivale a hacer pasar la señal analógica original a través de un banco de filtros de paso de banda muy estrechos en paralelo que cubren toda la banda de paso, y obtener a la salida de estos filtros, por separado, las distintas componentes espectrales de la señal. Los distintos filtros tienen el mismo ancho de banda. Todo este proceso se realiza digitalmente y por software.

Para más información al respecto de FFT véase el Apéndice 3: Notas adicionales sobre la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

6 SDR y la radioafición en el presente

6.1 Estado actual del arte

Los equipos de radio actuales que tienen la posibilidad de procesar digitalmente las señales (DSP) funcionan como cualquier receptor superheterodino, pero en lugar de utilizar filtros a cristal en la última IF, digitalizan la señal y la procesan digitalmente. De este modo, todo tipo de filtros, aun los que son imposibles de fabricar con componentes tangibles, pueden ser creados en software.

La mayoría de los transceptores existentes en el mercado que incorporan DSP solo pueden operar en SSB, CW, AM o FM. El DSP únicamente es utilizado con el objetivo de realizar diversos filtrados y eliminaciones de ruido. Si se utiliza el DSP también para demodular la señal recibida, entonces se llega a la Radio Definida por Software. Un transceptor implementado con los modos clásicos SSB, CW, AM y FM puede ser reimplementado unos años más tarde para dar cabida a un nuevo modo, como DRM (Digital Radio Mondiale) que se utiliza para transmisiones de Onda Corta comercial. Lo único que es preciso hacer para poder recibir el nuevo modo es cambiar el software mediante una actualización; el hardware sigue siendo el mismo.

Este modelo de trabajo constituye la ventaja principal de SDR respecto a plataformas tradicionales de transceptores de radio: la versatilidad. La misma plataforma de hardware puede ser utilizada para (casi) cualquier equipo de comunicación, no importa el ancho de banda o el modo de emisión/recepción.

6.2 Implementación SDR teórica llevada a la práctica

Todos los proveedores de equipos y tecnología para SDR, cuando tratan de implementar la definición teórica de SDR se enfrentan a dos problemas principales, que son la velocidad de muestreo o "sampleado" (asociado a las capacidades técnicas del ordenador, principalmente a la velocidad de su procesador) y la capacidad de manejo de señales (altas o bajas) del dispositivo digitalizador (asociado a las capacidades técnicas de la tarjeta de sonido).

El procesamiento digital de señales (DSP) introduce sus propios problemas y distorsiones respecto de la señal original, técnicamente denominados errores de cuantificación, que no existen en su contrapartida analógica. Esto sucede tanto en equipos convencionales de radio como en dispositivos SDR.

Algunos de los problemas de DSP pueden ser salvables con una correcta configuración de los elementos hardware y software; otros no. Se puede dar la posibilidad de que una frecuencia de muestreo o "sampleado" inadecuadamente configurada obvie peculiaridades de la señal analógica original que pueden no ser recogidas y representadas en su contrapartida digital (proceso conocido como interpolación). Estos comportamientos están definidos y expresados por el Criterio de Nyquist[16], criterio que expone la necesidad de que la velocidad de muestreo o "sampleado" sobre una determinada señal dada sea algo superior al doble de la mayor frecuencia a procesar, evitándose con esto el efecto "alias" o "aliasing". Este efecto, descrito en mayor detalle en el Apéndice 4, básicamente expone que, dada una velocidad inadecuada de muestreo, una frecuencia puede aparecer como si fuera otra una vez digitalizada.

Una tarjeta de sonido genérica puede procesar correctamente una frecuencia de muestreo de 48 kHz, por lo que podrá manejar señales que tengan hasta unos 24 kHz de ancho de banda. Los anchos de banda típicamente manejados en radioafición oscilan entre unos pocos Hz (CW) hasta unos 6 kHz (FM de banda estrecha), pasando por unos 2.6/2.7/3 kHz en el caso de SSB; incluso señales de AM o FM comercial están contenidas en un ancho de banda de unos 50 kHz o menos, por lo que pueden ser procesadas por una tarjeta de sonido genérica sin mucho esfuerzo.

En general, estas señales vienen moduladas en una banda base de mucha mayor frecuencia. Una señal de CW en la banda de 40 metros ocupa unos pocos Hz de ancho de banda pero su frecuencia es de 7 Mhz. Se necesitaría muestrear al doble de esa frecuencia (14 MHz) para procesar su señal directamente desde la antena (suponiendo que el dispositivo digitalizador pueda capturar una señal tan baja como la disponible en la antena). Una etapa mezcladora de radiofrecuencia puede llevar la frecuencia de la banda base desde niveles inmanejables para el dispositivo digitalizador hasta frecuencias que le son manejables. Si a una señal de CW presente en 7.020 MHz se la mezcla con una señal de oscilador local de 7.000 MHz se obtendrán una señal de 14.020 MHz (suma) y otra de 20 kHz (diferencia). Actuando con filtros sobre la primera frecuencia, la segunda entrará dentro de la gama que un dispositivo digitalizador económico, tal como una tarjeta de sonido común de un ordenador, puede procesar.

6.3 Nuevas tecnologías para nuevas generaciones

Los cambios operados en las tecnologías han comportado también cambios radicales en la organización del conocimiento, en los procesos cognitivos del ser humano y en la organización y prácticas sociales. Y es que la relación del hombre con la tecnología es compleja: él la crea y la utiliza para amplificar sus sentidos pero, a la vez, la propia tecnología lo transforma a su vez a él mismo y a la sociedad.

Se trata de una nueva sociedad en que se prevé que un porcentaje importante de la masa laboral mundial trabaje en el terreno de las nuevas tecnologías, que se sustentará sobre nuevas actividades relacionadas con las redes, el comercio electrónico, los hipermedia y los nuevos soportes

[16] Para más información, véase el Apéndice 4.

de comunicaciones. Estas innovaciones tecnológicas están provocando cambios sociales importantísimos en la organización del trabajo, en las relaciones empresariales, en la cultura y en la educación.

Las nuevas tecnologías tienen claras repercusiones sobre la educación dado que inciden en la conformación del ser humano y específicamente sobre los procesos cognitivos al amplificar los recursos mentales. Se incrementa nuestra capacidad para codificar, almacenar, procesar y transmitir todo tipo de formación y se está cambiando nuestra forma de conocer.

La introducción de las tecnologías de la información y la comunicación en educación, y por tanto en la sociedad el futuro, no es tarea fácil. La escuela siempre va detrás de la sociedad y hay un desfase evidente entre el uso que de las nuevas tecnologías y las diversas actividades sociales y económicas. Es en este punto donde las actividades extraescolares, como tales y como afición personal, tienen su punto de inflexión. Es aquí donde la radioafición tiene mucho que aportar a las nuevas generaciones y a la sociedad.

Un niño del siglo XXI convive, y convivirá, con nuevas tecnologías prácticamente desde su nacimiento, como si naciera con ellas incorporadas, de modo que rápidamente llegarán a constituir una parte natural, y muy atractiva, de su entorno, de su ser. En un mundo cada vez mas dominado por el software, base de la evolución de las nuevas tecnologías, parece difícil pensar en una afición que no tenga una disciplina afín.

No es de recibo, habida cuenta del camino tomado por la sociedad actual, que la generación presente pretenda inferir una distorsión tecnológica al mundo de la radioafición y a las nuevas generaciones de radioaficionados, quedándose anclados en el tiempo con el último artilugio de su respectiva generación.

Resulta sumamente paradójico saber que según recientes encuestas del CIS (Centro de Investigaciones Sociológicas), la población española tiende a una actitud positiva hacia los avances tecnológicos, con un 85% de la población como media, para luego ver lo que un universo infinitamente inferior piensa de los avances tecnológicos como SDR no son de interés en una mera afición.

Y es que lo que no parece comprender la sociedad radioaficionada actual es que los procesos sociales van más allá de uno mismo. Al igual que la generación Gutemberg (lápiz y papel) se convirtió en generación tecnológica (teclado, pantalla y ratón), la adopción de SDR en la radioafición será un hecho, habida cuenta de la importancia del software como base de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, base a su vez de la generación tecnológica actual.

7 CONCLUSIONES

Durante mucho tiempo ha habido cierta preocupación por la reducción de la experimentación en la radioafición. La misma preocupación ya fue expuesta por John Costas, ex-K2EN (indicativo actualmente expirado), en un artículo publicado hace más de 50 años. En él, John temía que el uso generalizado de SSB condujese a una rápida disminución de la iniciativa en la construcción de equipos de HF, con el consecuente impacto negativo en la radioafición. John también defendió activamente su postura contraria a la implementación de técnicas de banda ancha sobre la argumentación de que lo único que aportan estas técnicas son caos, congestión y poca eficiencia espectral. Si bien en el primer supuesto su punto de vista ha quedado demostrado ser erróneo, no así se puede afirmar, con rotundidad, en el segundo.

Técnicamente, SDR está íntimamente ligado a la revolución de las nuevas tecnologías. SDR no podría haber sido concebida sin el avance de ciencias como las matemáticas[17] y la informática, habida cuenta de que la mayor parte de la implementación de su modelo responde a usos y componentes hardware y software originariamente de ambos mundos.

[17] Véase el Apéndice 8 relativo a la matemática de SDR y del audio IQ.

Los conocimientos y destrezas que son precisos para la implementación de SDR están íntimamente ligados a la radio, es cierto, pero también a las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, segmento que es bien sabido tiene buena acogida en las generaciones más jóvenes. De hecho, en los últimos años ha quedado patente la facilidad de asimilación de conceptos de manejo, usabilidad, experiencia de usuario y destrezas cognitivas presentes en los más pequeños del hogar sobre elementos tecnológicos modernos. Y será ellos, los más jóvenes, los que formarán parte de las nuevas generaciones de la radioafición.

El mundo tecnológico actual es un mundo principalmente construido a base de software. Si algo se ha aprendido en el sector tecnológico industrial en los últimos 30 años es que es preciso "arquitecturizar" sobre el concepto de orientación a servicios[18]. En el nuevo mundo de los radioaficionados y SDR, la experimentación implicará no solo diseñar, construir y probar antenas y circuitos, sino también escribir software para realizar funciones de transmisor o receptor, modificando el software (si ya existe) para ajustarlo, o leer acerca de un nuevo programa de software (presumiblemente FLOSS[19]), descargarlo y probarlo sobre la marcha.

Sinceramente creo que este tipo de experimentación puede generar, de nuevo, interés por la radioafición, pues permite desarrollar habilidades de investigación que, por otra parte, cada vez más necesarias. Las tecnologías de radio son bien conocidas en la actualidad. Rara es aquella persona que no cuenta con un teléfono móvil, un tablet, un punto de acceso inalámbrico en casa o incluso otros elementos más cercanos a la radioafición "tradicional", como un equipo receptor de radio o un walky-talky. La experimentación sobre el medio de radio puede enmarcarse dentro de una estrategia de aprendizaje serena y distendida, con objetivos bien definidos, como lo es una distracción o una afición.

Para las generaciones actuales, no obstante, la principal barrera de entrada a SDR, que se podría suponer erroneamente debida a la indisponibilidad tecnológica o la carencia de conocimientos y destrezas, esta resulta no es la principal barrera de entrada. La principal barrera de entrada a SDR para un radioaficionado actual son sus propios prejuicios[20], respecto de las diversas modalidades de operación existentes en su propia afición. Siendo un poco kafkiano se podría justificar que la actual comunidad de radioaficionados, aquella que debe de servir de base para el desarrollo de futuras generaciones, no está interesada en el desarrollo de su propia afición, mucho menos de radios basadas en software y, por supuesto, de software para radios.

Muy probablemente la comunidad de radioaficionados no está percibiendo la importancia de la adopción del software dentro de la sociedad, en general, y de la radioafición, en particular, y por lo tanto no se está valorando de manera correcta y científica la problemática que se podría presentar a unos pocos años vista respecto de la disponibilidad (o no) de equipos y componentes, dado su excesivo coste de producción y mantenimiento (soporte).

---

[18] SOA: Service Oriented Architecture; Arquitectura Orienta a Servicios, es un concepto de arquitectura de software que define la utilización de servicios para dar soporte a los requisitos de diseño (por razones técnicas y/o de negocio). SOA permite la creación de sistemas de información altamente escalables e intercomunicables, a la vez brinda una forma bien definida de exposición e invocación de servicios, lo cual facilita la interacción entre diferentes sistemas propietarios o de terceros. SOA, además, proporciona una metodología y un marco de trabajo estructurado para la consecución de los objetivos fijados de inicio. SOA hace uso de servicios débilmente acoplados y altamente interoperables entre sí para comunicarse. SOA es el máximo exponente del concepto de integración. Contrariamente, son el acoplamiento de funciones y la no adecuación a estándares los principales enemigos de este modelo.

[19] El software libre y de código abierto (también conocido como FOSS o FLOSS, siglas de free/libre and open source software, en inglés) es el software que está licenciado de tal manera que los usuarios pueden estudiar, modificar y mejorar su diseño mediante la disponibilidad de su código fuente. El software gratis no necesariamente tiene que ser libre o de código abierto (ni viceversa).

[20] El prejuicio es el proceso de formación de un concepto o juicio sobre alguna cosa de forma antes de tiempo. Implica la elaboración de un juicio u opinión antes de determinarse la evidencia sin antes tener ninguna experiencia directa o real. En esencia, consiste en criticar de forma positiva o negativa sin tener suficientes elementos de juicio previos. Es una actitud que puede observarse en todos los ámbitos y actividades de la sociedad, en cualquier grupo social y en cualquier grupo de edad, e implica una forma de pensar íntimamente relacionada con comportamientos o actitudes de discriminación.

Y es que de los tres sectores de la producción industrial, dos de ellos, el secundario (transformación) y el terciario (servicios) prácticamente son gobernados por software. El sector de los servicios, en sentido amplio, es el elemento central de las economías desarrolladas, así como el sector de mayor crecimiento económico. Hoy día se hace difícil hablar de servicios sin hablar del software que, en la mayoría de los casos, los sustentan.

Pese a todo, estoy seguro que esta afición saldrá adelante. Quién diría que, casi 200 años después, esta afición sigue siendo igual de apasionante que lo fue en sus inicios…

“Lo que Dios ha forjado”

“What hath God wrought"

Del original en el Libro de los Números, la Torah, biblia hebrea, Números 23:23

Primeras palabras enviadas por telégrafo

Samuel Morse

24 de Mayo de 1844

8 APÉNDICES

8.1 Apéndice 1: Reloj electrónico casero para usos de radio y electrónica

Una solución barata para la obtención de una fuente de tiempo mayormente estable es la lectura de la frecuencia de suministro en la señal de la instalación eléctrica domiciliaria. En Europa el suministro eléctrico tiene un periodo de 50 Hz (en algunos países americanos y asiáticos es de 60 Hz). Esta señal se puede obtener con el mismo transformador que se emplea en una fuente de alimentación.

Para poder utilizar esta señal como fuente de tiempo es preciso acondicionarla para que esté, por ejemplo, entre 0 y 5 V (tensiones típicas de los circuitos electrónicos) en forma cuadrada. Esta cuadratura de la señal se puede obtener muy fácilmente con la implementación de un diodo Zener.

La señal eléctrica es suministrada desde las subestaciones eléctricas con un periodo de 20 milisegundos[21] (50Hz) o de 16,7 milisegundos[22] (60Hz). Para obtener una señal de reloj de 1 Hz, se debe implementar un dispositivo contador que cuente hasta 50 (para 50Hz) o hasta 60 (para 60Hz).

De esta manera se puede obtener un reloj de 1 segundo de periodo de ciclo estable.

8.2 Apéndice 2: Proyecto OpenBTS (estación base de telefonía GSM)

Actualmente existen numerosos proyectos cuyo trasfondo es el concepto SDR. Entre ellos cabe destacar el ambicioso proyecto OpenBTS con el que se persigue implementar una estación base de telefonía GSM en software a partir de la arquitectura GNU Radio[23] en auxilio de SDR USRP, el cual a su vez se apoya en Asterisk[24] para el servicio de telefonía tradicional y VoIP.

A modo de ejemplo, la Figura 7 presenta la arquitectura funcional de OpenBTS:

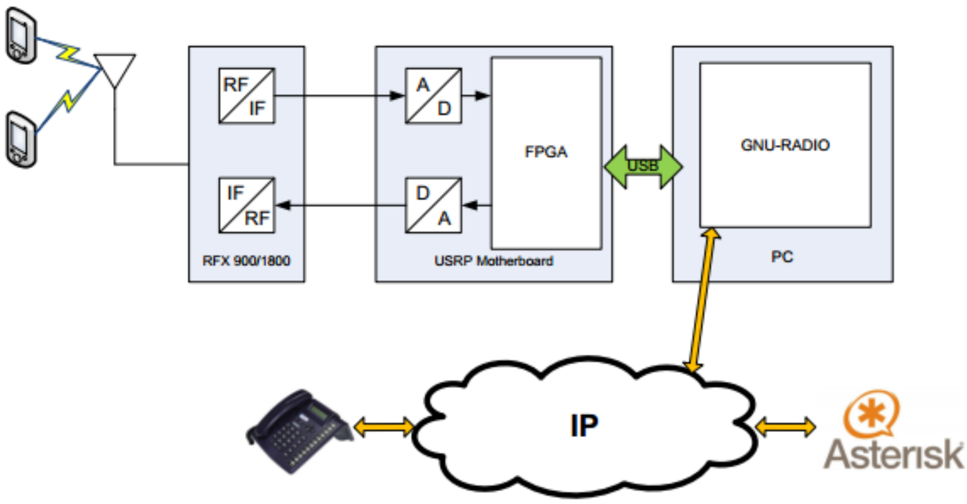


Figura 7: Arquitectura funcional OpenBTS basada en SDR USRP, GNU Radio y Asterisk

[21] Recuérdese que la electricidad suministrada desde la central eléctrica viaja como corriente alterna (AC) y varía en lapsos de tiempo como los mencionados. La corriente alterna es aquella en que la que la intensidad (cantidad de electricidad) cambia de dirección periódicamente en un conductor como consecuencia del cambio periódico de polaridad de la tensión (fuerza impulsora) aplicada en los extremos de dicho conductor. Recuérdese, asimismo, que la corriente utilizada en dispositivos electrónicos es directa/continua (DC), cuyo flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial no cambia de sentido con el tiempo.

[22] Ibid.

[23] http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki

[24] http://www.asterisk.org/

8.3 Apéndice 3: Notas adicionales sobre la Transformada Rápida de Fourier (FFT)

FFT es la abreviatura usual (del inglés, Fast Fourier Transform) de un eficiente algoritmo que permite calcular la transformada de Fourier discreta (DFT) y su inversa.

La FFT es de gran importancia en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento digital de señales y filtrado digital en general a la resolución de ecuaciones en derivadas parciales o los algoritmos de multiplicación rápida de grandes enteros.

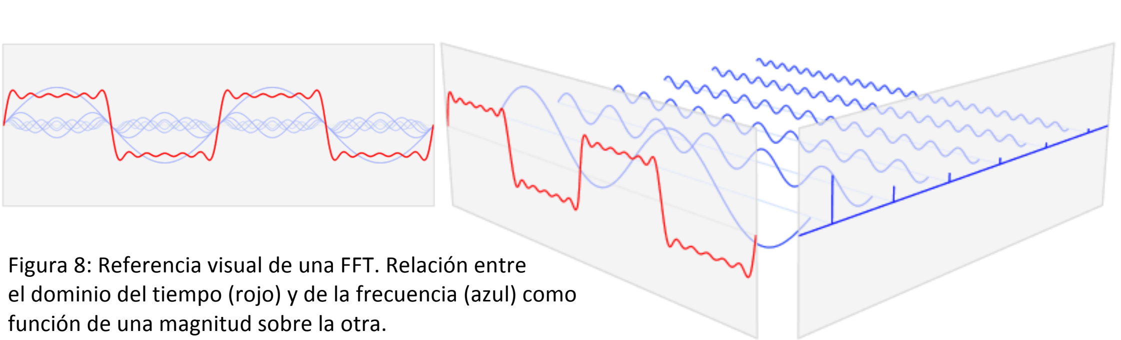
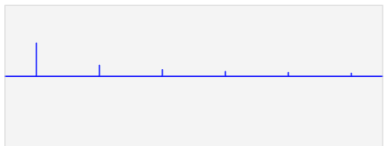


Figura 8: Referencia visual de una FFT. Relación entre el dominio del tiempo (rojo) y de la frecuencia (azul) como función de una magnitud sobre la otra.



El algoritmo pone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante. Por ejemplo, la señal de la que se han de tomar las muestras, y que se va a transformar, debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos. La mayoría de los analizadores FFT permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

FFT es un medio eficaz de ejecutar un cálculo matemático básico y su empleo es frecuente. La transformada rápida de Fourier es de importancia fundamental en el análisis matemático y ha sido objeto de numerosos estudios. La aparición de un algoritmo eficaz para esta operación fue una piedra angular en la historia de la informática.

Las aplicaciones de la FFT son múltiples. Es la base de muchas operaciones fundamentales del procesamiento digital de señales, donde tiene amplia utilización. Además, proporciona un medio oportuno para mejorar el rendimiento de los algoritmos para un conjunto de problemas aritméticos comunes.

8.4 Apéndice 4: Criterio de Nyquist y la velocidad de muestreo de una señal

El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, también conocido como teorema de muestreo de Whittaker-Nyquist-Kotelnikov-Shannon, criterio de Nyquist o teorema de Nyquist, es un teorema fundamental de la teoría de la información, de especial interés en las telecomunicaciones. Este teorema fue formulado en forma de conjetura por primera vez por Harry Nyquist en 1928 (Certain topics in telegraph transmission theory), y fue demostrado formalmente por Claude E. Shannon en 1949 (Communication in the presence of noise).

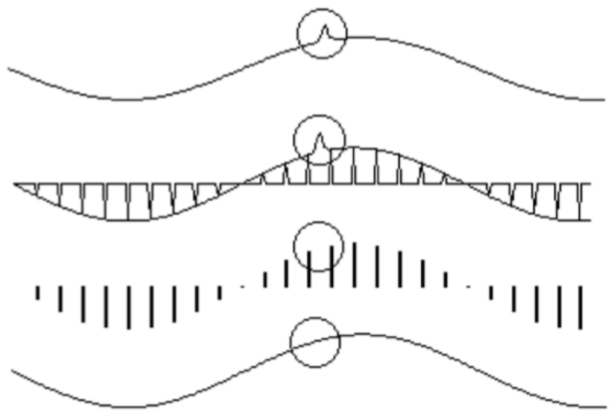
El teorema trata del muestreo, que no debe ser confundido o asociado con la cuantificación, proceso que sigue al de muestreo en la digitalización de una señal y que, al contrario del muestreo, no es reversible (se produce una pérdida de información en el proceso de cuantificación, incluso en el caso ideal teórico, que se traduce en una distorsión conocida como error o ruido de cuantificación y que establece un límite teórico superior a la relación señal/ruido). Dicho de otro modo, desde el punto de vista del teorema, las muestras discretas de una señal son valores exactos que aún no han sufrido redondeo o truncamiento alguno sobre una precisión determinada, es decir, aún no han sido cuantificadas.

El teorema demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras, es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la

tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda. Dicho de otro modo, la información completa de la señal analógica original que cumple el criterio anterior está descrita por la serie total de muestras que resultan del proceso de muestreo. No hay nada, por tanto, de la evolución de la señal entre muestras que no esté perfectamente definido por la serie total de las mismas.

Nyquist formuló este teorema para dar a entender que para que sea posible distinguir correctamente todas las frecuencias de las señales componentes, la frecuencia del muestreo debe ser de al menos del doble de la mayor frecuencia de las componentes válidas de la señal. Sucede que generalmente se muestrea o “samplea” una la señal a intervalos y generalmente no se sabe que ocurre entre mediciones sucesivas. Es posible tener componentes de una señal que están variando muy rápidamente de forma, existiendo variaciones significativas entre muestreos. Para atajar este problema, la solución propuesta por Nyquist pasaba por muestrear a la suficiente velocidad para poder capturar la mayoría de los cambios en la señal y, además, filtrar la señal de entrada con el objetivo de eliminar componentes indeseables de la señal. Al final si no se muestrea con la suficiente velocidad, y se filtra la entrada de la misma, no se podrá seguir con la suficiente precisión los cambios en una señal. Cuando esto ocurre, transiciones de frecuencia alta pueden ser (falsamente) interpretadas como de frecuencia menor, y efectos “alias” pueden ser percibidos.

Los grandes conceptos contenidos en el Criterio de Nyquist pueden ser expresados de forma más simple mediante las siguientes figuras ilustrativas:



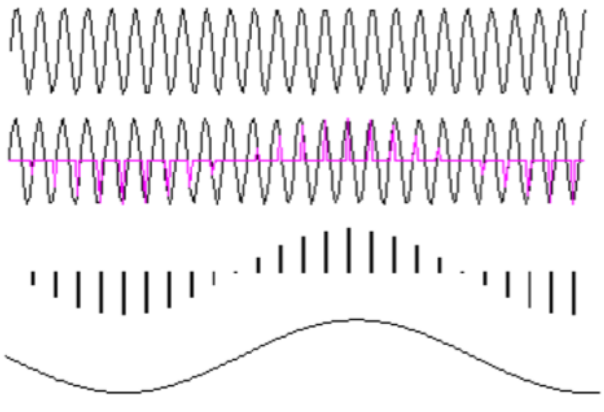
Una peculiaridad presente en una señal analógica...

... que no es apreciada dada una incorrecta velocidad de muestreo...

... aparece en su contrapartida digital...

... como si no existiera.

Figura 9: Relación entre la velocidad de muestreo de una señal analógica y su representación digital



Una señal de alta frecuencia...

... muestreada a una tasa demasiado baja...

... aparece en su contrapartida digital...

... como una señal de baja frecuencia.

Figura 10: Ejemplo de una velocidad de muestreo inadecuada

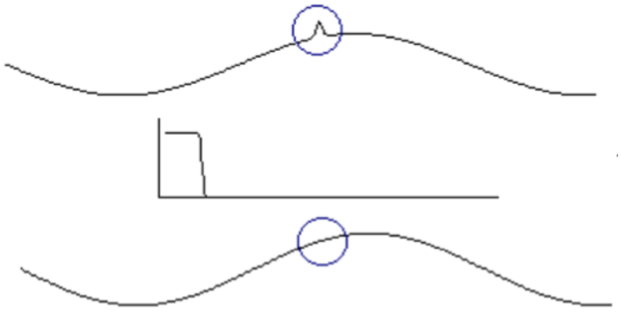


Figura 11: Proceso de “antialiasing”

En la actualidad, prácticamente todo el proceso concerniente al Criterio de Nyquist descrito hasta el momento tiene lugar dentro de la tarjeta de sonido y es parte del funcionamiento convencional de la misma. Aquellos procesos no realizados de forma nativa por la tarjeta de sonido son llevados a cabo en software por los programas de representación SDR.

8.5 Apéndice 5: Receptor superheterodino común y su evolución

El receptor superheterodino lleva a cabo casi toda la amplificación de la frecuencia constante, denominada IF, utilizando una frecuencia fija, con lo que se consiguen ajustes más precisos en los circuitos y se aprovecha todo lo que puede dar el componente utilizado (válvula termoiónica, transistor o circuito integrado).

En los receptores domésticos de AM, la IF es de 455 kHz o 470 kHz; en los receptores de FM generalmente es de 10,7 MHz. Los receptores superheterodinos mezclan o heterodinan una frecuencia generada en un oscilador local, contenido en el receptor, con la señal entrante en antena. De esta heterodinación resultan dos frecuencias: una superior (sumatorio) y otra inferior (diferencial) a la frecuencia entrante. Una de ellas, normalmente la inferior, es elegida como IF, filtrada con un filtro de alto Q factor de calidad, amplificada y posteriormente detectada o demodulada para obtener la audiofrecuencia que se oirá, después de ser convenientemente amplificada, a través de un altavoz. El usuario sintoniza el receptor mediante el ajuste de la frecuencia del oscilador local y la sintonización de las señales entrantes.

En la mayoría de los receptores estos ajustes se realizan de forma simultánea, actuando sobre un condensador variable con dos secciones en tándem, esto es, acopladas en el mismo eje. Una de las secciones de este condensador forma parte del circuito oscilador local y la otra del de sintonía de la señal entrante, de tal forma que cuando se varía la frecuencia sintonizada en la entrada, se varía también la frecuencia del oscilador local, manteniendo constante la diferencia entre ambas, que es la IF. A este efecto se lo denomina "arrastre". Actualmente, casi todos los receptores utilizan este método.

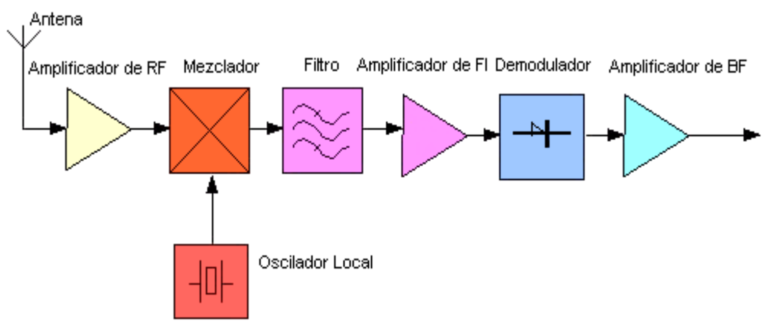


Figura 12: Receptor superheterodino

La Figura 12 muestra los elementos básicos de un receptor superheterodino de conversión simple. En la práctica no todos los diseños tendrán todos los elementos de este esquema, ni este cubre la complejidad de otros diseños, pero los elementos esenciales (un oscilador local, un mezclador seguido por un filtro y un amplificador de IF) son comunes a todos los receptores superheterodinos.

En el receptor superheterodino el filtro/amplificador de RF (radiofrecuencia) aísla la señal que se desea recibir del resto de las señales que llegan a la antena. Este filtro paso banda es genérico, por lo que tiene poca selectividad en frecuencia.

El mezclador recorre el espectro en frecuencia de la señal filtrada, centrándolo alrededor de la IF (frecuencia intermedia). Para desplazar el espectro, el mezclador utiliza la componente de conversión ascendente o descendente, según convenga. El filtro de IF aísla perfectamente la señal a demodular, ya que es un filtro de alta selectividad en frecuencia.

El detector demodula la señal de IF, es decir, recupera el espectro de la señal original, y el amplificador le da a la señal de salida la ganancia que necesita.

A veces, para superar obstáculos tales como el fenómeno del aliasing (frecuencias imagen), se utiliza más de una IF. En estos casos se utilizan dos conversores y al receptor así diseñado se le denomina receptor superheterodino de doble conversión. Frecuentemente se elige como primera IF 10,7 MHz y como segunda 455 kHz. Para obtener 455 kHz desde los 10,7 MHz se mezcla la primera IF con una señal proveniente de un oscilador local fijo a 10,245 MHz. Esta frecuencia suele venir fijada por un cristal de cuarzo. Existen, además, superheterodinos de triple y cuádruple conversión.

Como no podría ser menos, la (r)evolución de diseño del superheterodino es la arquitectura de radio definida por software (SDR), donde el procesamiento de la IF después del filtro inicial de IF es realizado por software.

8.6 Apéndice 6: Frecuencias Intermedias (IF) más comunes en radioafición

La siguiente es una pequeña lista con las IF más comunes en equipos de radioafición:

- 4.915 MHz: Elecraft K2.
- 8.215 MHz: Elecraft K3.
- 8.83 MHz: la gran mayoría de eqiupos Kenwood “vintage”.
- 9.00 MHz: Yaesu FTdx5000 y TenTec Orion.
- 10.55 MHz: Yaesu FT-950 y FT-2000, y previsiblemente todos los equipos nuevos.
- 10.7 MHz: Icom IC-R8500/9500 y otros de su gama.

Como ya se describiera, se denomina frecuencia intermedia (IF) a la frecuencia que, en los sistemas de radio, emplean el principio superheterodino que se obtiene de la mezcla de la señal sintonizada en antena con una frecuencia variable, generada localmente en el propio sistema de radio mediante un oscilador local, y que guarda con ella una diferencia constante. Esta diferencia entre las dos frecuencias es precisamente la frecuencia intermedia.

La utilidad del empleo de una frecuencia intermedia radica en el hecho de que todos los circuitos sintonizados existentes a partir de la etapa en que se efectúa la mezcla trabajan a una frecuencia fija (la de la IF) y, por tanto, son más fáciles de ajustar. De este modo se mejora la selectividad y se facilita el diseño de las etapas amplificadoras. Si no se empleara la frecuencia intermedia, sería preciso diseñar circuitos sintonizadores que tuvieran al mismo tiempo una gran selectividad y un gran rango de selección de frecuencias de actuación, algo difícil y caro de conseguir.

8.7 Apéndice 7: Versión avanzada del Detector de Tayloe

En el apartado 5.4 se introducía el sencillo Detector por Muestreo de Cuadratura, Detector QSD o Detector Tayloe. Esta extremadamente sencilla y elegante pieza de tecnología (patentada por su autor) se describe en la Figura 13, a continuación, en un circuito más complejo y potente, como los realmente implementados en sistemas SDR actuales.

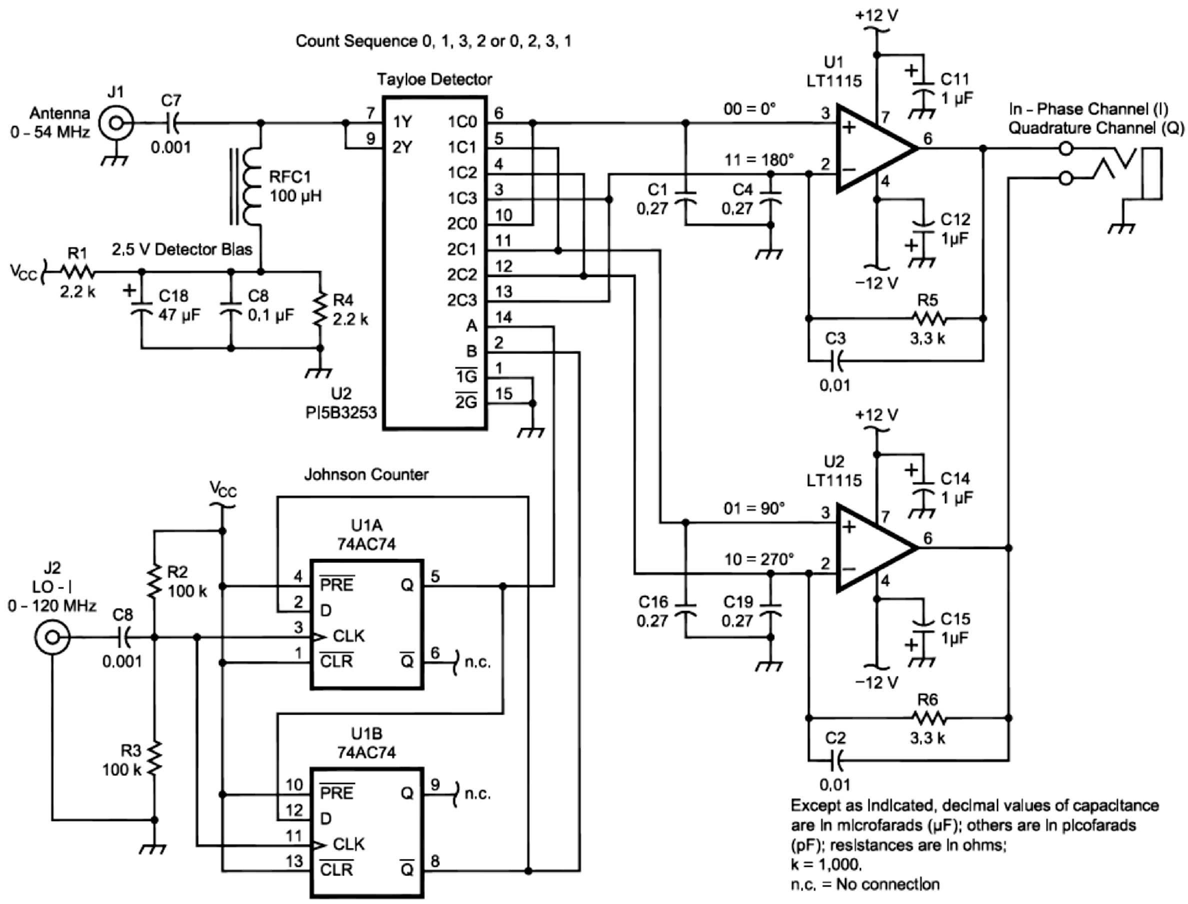


Figura 13: Detector de Tayloe (QSD) complejo

8.8 Apéndice 8: La matemática detrás de SDR y el audio I y Q

El audio IQ y las señales I y Q están basados sobre la notación de números complejos, una materia base en el desarrollo e interacción con DSP. La terminología operador *"j", complejo, imaginario, real* y *ortogonal* se antoja de difícil asimilación para los neófitos.

La cuadratura de la señal y su procesado es una técnica que se utiliza en múltiples campos de la ciencia y la ingeniería, y es necesaria para describir como operan los sistemas de comunicaciones modernos. Algunos de las aplicaciones que requieren del procesado IQ son los sistemas de comunicaciones digitales, sistemas de radar, la cuantificación de la diferencia de tiempo en los esquemas de dirección de radio, sistemas de medición por pulsos, aplicaciones de orientación de antenas, moduladores de banda lateral única, etc…

La cuadratura de la señal es una señal bidimensional cuyos valores en un determinado instante pueden ser especificados por un único numero complejo, compuesto de dos partes, una parte *real* y una parte *imaginaria*. Dado que los términos "*real*" e "*imaginario*" en ingeniería se antojan un tanto

fuera de lugar, en su lugar se utilizan los términos “en fase” (in-phase) y “cuadratura” (quadrature), respectivamente.

Para establecer una terminología, se define un numero real como aquellos números que pueden ser utilizados en el día a día, como valores de voltaje, temperatura, o saldo económico. Estos números de una sola dimensión pueden ser positivos o negativos. Estos números pueden ser representados en un eje único de números reales (real axis) como presenta la Figura 14.

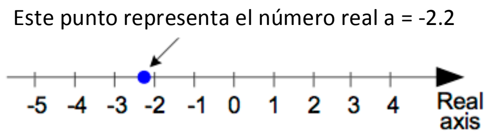


Figura 14: Eje de números reales (real axis)

Un número complejo, tal y como se presenta en la Figura 15, también puede ser representado con un único punto. No obstante, los números complejos no están restringidos a residir en una única dimensión. Pueden residir en planos bidimensionales. Estos planos son denominados planos complejos o diagramas de Argand, y permiten representar números complejos que tienen parte real y parte imaginaria.

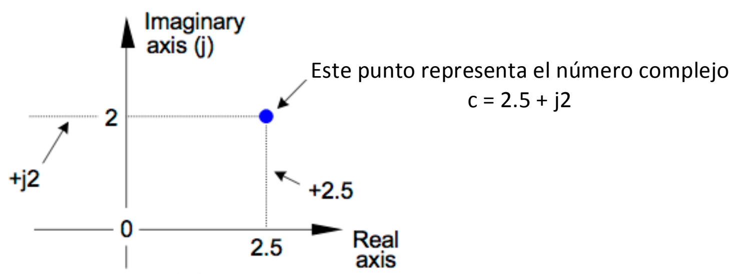


Figura 15: Ejes de números complejos

Mediante la geometría es posible comprender la aritmética de los números complejos. En concreto mediante la trigonometría con triángulos de ángulo recto es posible definir diferentes modelos de representación para el numero complejo “*c*”.

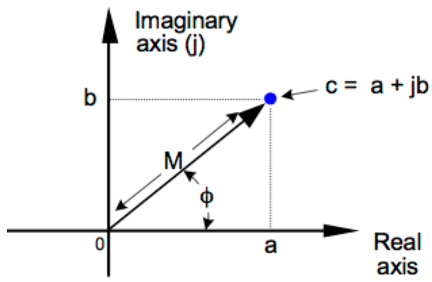


Figura 16: Representación del fasor del número complejo c = a + jb en un plano complejo

Según la nomenclatura matemática el numero complejo de la Figura 16 puede ser notado en forma rectangular, en su forma trigonométrica, en forma polar o en su magnitud de ángulo. La forma rectangular, también denominada de eje cartesiano, es la forma mas común de exposición dada su

facilidad de comprensión. Su forma es la que se representa en la Figura 16, es decir, c = a + jb. La notación trigonométrica se utiliza comúnmente para describir la cuadratura de la señal en los sistemas de comunicaciones. Su forma es c = M[cos(Φ) + jsin(Φ)]. La notación polar es la más extraña y se utiliza generalmente en el desarrollo de matemáticas teóricas. Su forma es c = Mexp(jΦ). Finalmente la notación de magnitud de ángulo toma la forma c = M ∠ Φ, utilizado para propósitos descriptivos por ser demasiado incomodo para ecuaciones algebraicas.

Las notaciones polar y de magnitud de ángulo recuerdan que el tratamiento que se le debe de proporcionar a "*c*" es la de fasor[25] en el plano complejo, con magnitud M, en la dirección de Φ grados relativos al eje real positivo, como indica la Figura 16. Todas la variables del numero complejo "*c*" son números reales. La magnitud de "*c*", a veces denominada modulo de "*c*" seria M = |c| = $\sqrt{a^2 + b^2}$.

Avanzando en la materia, muchos habrán visto la definición de j = $\sqrt{-1}$ antes. Dicho de otra forma, el operador "*j*" representa un número que multiplicado por sí mismo resulta en un número negativo. Esta es una definición difícil de comprender dado que la definición matemática tradicional indica que un numero multiplicado por si mismo resulta en un número positivo. La existencia de la notación anterior del operador "*j*" data del siglo XVI, aunque no se le presto demasiada importancia hasta que Leonard Euler reparó en ella. Euler utilizo dicha definición en conjunto con sus estudios de números complejos de senos y cosenos y la representación sobre el plano complejo de Gauss. Euler apreció y demostró cierta relación entre los números complejos y los senos y cosenos. Como descripción genérica y sin entrar en demasiado lujo de detalles, los estudios de Euler y Gauss arrojaron que en la naturaleza del operador "j" implicaba la rotación de un numero complejo 90º en sentido contrario a las agujas del reloj sobre un plano complejo. Esta rotación teórica puede ser representa como se aprecia en la Figura 17.

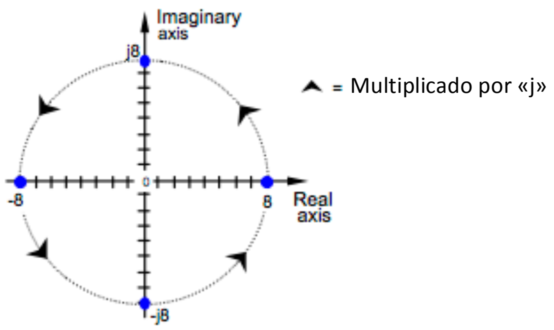
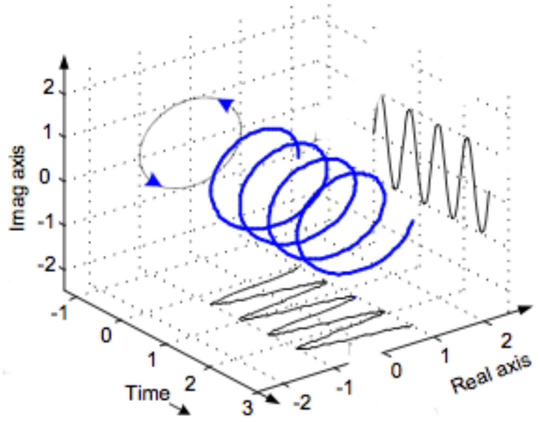


Figura 17: Comportamiento del numero real 8 al ser multiplicado por el operador «j»

Multiplicando cualquier número en el eje real (real axis) por "*j*" resulta un producto imaginario que reside en el eje imaginario (imaginary axis). El ejemplo de la Figura 17 representa el valor +8. Sucesivas operaciones de multiplicación arrojan que existe una rotación de 90º respecto de la posición anterior en sentido contrario a las agujas del reloj, obteniéndose como resultado de la operación un nuevo número complejo que resulta rotado sobre su posición original.

Considerando un número cuya magnitud es uno y cuyo ángulo de fase incrementa con el tiempo se introduce la idea de un sinusoide, representación como versión continua de un fasor, centrada sobre un nuevo eje, el eje del tiempo.

[25] Un fasor es una representación gráfica de un número complejo que se utiliza para representar una oscilación, de forma que el fasor suma de varios fasores puede representar la magnitud y fase de la oscilación resultante de la superposición de varias oscilaciones en un proceso de interferencia. El tratamiento matemático es similar a la de un vector.



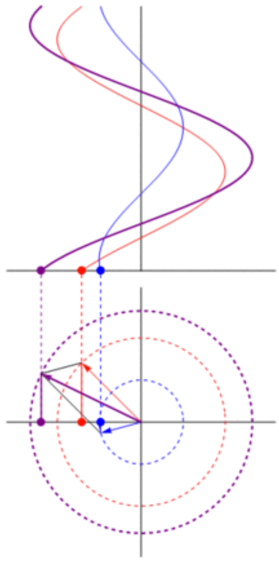


Figura 18: Revolución sobre ejes tridimensionales de un fasor (sinusoide)

La Figura 18 representa gráficamente la revolución de la punta de un fasor centrada sobre el eje del tiempo, generando una espiral en sentido contrario a las agujas del reloj, dando lugar a un sinusoide, cuyas proyecciones pueden ser perfectamente calculadas en alguna de las anteriores notaciones matemáticas, tal y como ya se describiera.

Finalmente, en el procesamiento de señales, por convención, la parte de los números relaes, la parte real del espectro, pasa a denominarse “in-phase” (“I”), mientras que la parte imaginaria pasa a denominarse “quadrature” (“Q”).

9 RECONOCIMIENTOS

Este material está basado en los trabajos, y sus correspondientes traducciones, de Mike Marcus (N3JMM/7J1AKO), Vladimir Polyakov (RA3AAE), Julián García (XE1CGJ), Luc Favre (F6HJO/HB9ABB), Pedro Colla (LU7DID), Fernando Fernández (EB3EMD), Gerald Youngblood (K5SDR/AC5OG), Dan Tayloe (N7VE), Richard Campbell (KK7B), Marcelo Franco (N2UO), Steve Ireland (VK6VZ), Phil Harman (VK6APH) y Oliver Welp (DL9QJ).

Un agradecimiento especial a Juan Flores Carmona, ingeniero superior de telecomunicaciones, y a Hugo Meré Rogero (EA1GIY), ingeniero de maquinas navales, por sus labores de revisión técnica. La inestimable colaboración de ambos ha permitido mantener un equilibrio razonable, entre la visión más académica y la visión de más fácil comprensión para no iniciados, del tema objeto en este trabajo.

Finalmente, unos últimos agradecimientos, no por ello menos importantes, (1) a la organización de las XXII Jornadas de Radioafición de Avilés (Principado de Asturias), Sección Comarcal de URE (Unión de Radioaficionados Españoles) de Avilés, por su iniciativa en pos del desarrollo de la radioafición española y de la dinamización cultural de la región, agradeciendo la invitación cursada para colaborar, dentro de los objetivos trazados, con el presente trabajo, y (2) a la comunidad de radioaficionados en general, por su tolerancia y consideración, espíritu social, compromiso y actitud siempre positiva respecto a los demás, así como a la superación de uno mismo.

A todos, muchas gracias.

10 REFERENCIAS

1. BASTIAN, P. *Electrotecnia: ciclos formativos*. Tres Cantos: Akal, 2001. 560 pp. ISBN-10: 8446013460.
2. BASTIAN, P. *Electrotecnia: Bachillerato 2º*. Madrid: Akal, 2001. 433 pp. ISBN-10: 8446017415.
3. COSTAS, J. *Poisson, Shannon and the Radio amateur*. Actas de congrego IRE, Diciembre 1959.
4. ESSOR: European Secure SOftware defined Radio [recurso en línea]. Bonn (Alemania): OCCAR (Organisation for Joint Armament Cooperation). 2013 Agosto. Disponible en: http://www.occar.int/36
5. GUNN, J.E. *SDR Market studies overview* [recurso en línea]. 2013 Agosto. Disponible en: http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/tut-Market_Studies_Overview.pdf
6. HIGHTOWER, M. Simple SDR Receiver. Looking for some hardware to learn about SDR? This project may be just what you need to explore this hot topic!. QEX, Forum for Communications Experimenters [recurso en línea]. Newington, Connecticut (Estados Unidos): Amateur Radio Relay League (ARRL). 2012 Marzo y Abril. Disponible en: http://www.arrl.org/files/file/QEX_Next_Issue/Mar-Apr_2012/Hightower.pdf
7. LYONS, R. *Quadrature signals: complex but not complicated* [recurso en línea]. 2008 Enero. Disponible en: http://www.dspguru.com/sites/dspguru/files/QuadSignals.pdf
8. MARCUS, M. *Linux, Software Radio and the Radio Amateur. How software radio technology might revitalize experimentation in Amateur Radio.* QST Magazine [recurso en línea]. Newington, Connecticut (Estados Unidos): Amateur Radio Relay League (ARRL). 2002 Octubre. Disponible en: http://www.arrl.org/files/file/Technology/tis/info/pdf/0210033.pdf
9. NYQUIST, H. *Certain topics in telegraph transmission theory*. High Voltage Transmission Comitee, AIEE[26], Volumen 47, páginas 617-644, Abril de 1928.
10. OpenBTS [recurso en línea]. 2013 Agosto. Disponible en: http://openbts.org/
11. OPPENHEIM, A. y SCHAFFER, R. *Discrete time signal processing*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989.
12. OPPENHEIM, A., WILLSKY, A. y HAMID, S. *Signals and Systems*. 2ª Edición. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 975 pp. Prentice Hall Signal Processing Series. ISBN-13: 9780138147570.
13. PAPOULIS, A. *Signal analysis*. New York: McGraw-Hill, 1977.
14. PAPOULIS, A. *The Fourier integral and its applications*. New York: McGraw-Hill, 1987. Classic Textbook Reissue Series.
15. PORTER, M. *Value Chain Framework* [recurso en línea]. 2013 Agosto. Disponible en: http://valuebasedmanagement.net/methods_porter_value_chain.html
16. PRATT, W. *Digital image processing*. New York: Wiley & Sons Inc, 1991.
17. PROAKIS, J. y MANOLAKIS, D. *Digital signal processing. Principles, algorithms and applications*. 3ª Edición. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 1033 pp. ISBN-10: 0133943389.
18. PUCKER, L. *SDR Architecture* [recurso en línea]. 2013 Agosto. Disponible en: http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/tut-SDR_Architectures.pdf
19. PUCKER, L. *Software Defined Radio Technology in Commercial and Military Applications: A Contrast in Requirements.* Actas de la Conferencia Técnica SDR 2002, Noviembre 2002.
20. SHANNON, C. *Communication in the presence of noise*. Actas de congresos del Institute of Radio Engineers, Volumen 37, Número 1, páginas 10-21, Enero 1949.
21. VILAFONT, A. *Armónicos y espurias* [recurso en línea]. Madrid: Radio Noticias. 2009 Enero. Disponible en: http://www.radio-noticias.eu/articulos/Armonicos.pdf
22. WINTSEC (Wireless INTeroperability for SECurity): Proyecto del 7º Programa Marco EU [recurso en línea]. Bruselas (Bélgica): CORDIS (EU). 2013 Agosto. Disponible en: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/security/docs/wintsec_en.pdf

[26] AIEE, American Institute of Electrical Engineers, es el precursor del actual IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Para más información visite el sitio web del IEEE: http://www.ieee.org